



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**EXPERIMENTÁLNÍ 3D TISKÁRNA PRO LASEROVÉ
SINTROVÁNÍ PLASTŮ**

EXPERIMENTAL 3D PRINTER FOR THE SELECTIVE LASER SINTERING OF POLYMERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kroutil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Kroutil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální 3D tiskárna pro laserové sintrování plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Selective laser sintering je poměrně často využívanou technologií pro výrobu vysoce kvalitních plastových dílů. Cena některých hlavních součástí, jako např. laserů, se dostává na úroveň spotřební elektroniky a je přístupná široké veřejnosti. To povede na vývoj nízkonákladových SLS tiskáren. Pro pochopení a testování různých vlivů parametrů procesu laserového natavování částic je potřeba vyvinout testovací komoru, která splní definovaná provozní kritéria a umožní vývoj cenově dostupného zařízení. Předpokládá se zpracování polyamidového prášku, případně materiálů plněných hliníkem. Součástí práce je testování a odladění procesních parametrů.

Typ práce: konstrukční

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je konstrukce 3D tiskárny pracující na principu laserového spékání polymerních práškových materiálů.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definice hlavních procesních parametrů,
- návrh variant řešení,
- konstrukce a realizace výroby,
- ověření funkce tiskárny.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, výkres sestavení, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas. Rapid prototyping. 1st ed. Munich ; Cincinnati: Hanser Publishers ; Hanser Gardner Publications, 2003, xv, 379 s. : il., čb. fot. ISBN 3-446-21259-0.

KAMRANI, Ali K a Emad Abouel NASR. Rapid prototyping: theory and practice. New York: Springer, 2006, xxxiii, 323 s. : obr., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 0-387-23290-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací experimentální 3D tiskárny pro selektivní laserové sintrování plastových prášků. Výstupem práce je zařízení, které dokáže vytvořit vhodné procesní podmínky pro laserové sintrování. V přístroji je použit diodový laser, který umožňuje zpracovat kompozitní prášky s hliníkem. Tiskárna umožňuje vyhřívat nanesenou vrstvu prášku a stavěcí prostor. Rešeršní část se věnuje podobným zařízením, procesním parametrům, laserové technologii a řídicímu systému. Konstrukční část obsahuje varianty řešení a popis vybraného řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser sintering, Aditivní výroba, 3D tiskárna

ABSTRAKT

The diploma thesis deals with design and realization of experimental 3D printer for selective laser sintering of plastic powders. The output of the work is a device that can create the main process conditions for laser sintering. A diode laser is used in the device, which allows aluminum composite powders to be processed. The printer allows you to heat up the applied layer of powder and set-up space. The research section focuses on similar equipment, process parameters, laser technology and control system. The design section contains solution variants and a description of the chosen solution.

KEYWORDS

Selective laser sintering, Additive Manufacturing, 3D printer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROUTIL, T. *Experimentální 3D tiskárna pro laserové sintrování plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D, a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne.....

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za vedení mé práce,
cenné rady a připomínky.

OBSAH

1 Úvod	13
2 Přehled současného stavu poznání	14
2.1 Selective laser sintering (SLS)	14
2.2 Výrobní proces	15
2.3 3D tiskárny pro práškové materiály	15
2.3.1 Profesionální 3D tiskárny	15
2.3.2 Stolní tiskárny	19
2.3.3 Nekomerční tiskárny	20
2.4 Procesní parametry	21
2.4.1 Laserová technologie	21
2.4.2 Pohyb laserového svazku	23
2.4.3 Materiály	24
2.4.4 Vyhřívání prášku	25
2.4.5 Degradace prášku	26
2.4.6 Kvalita dílu	26
2.4.7 Hustota energie laseru	26
2.4.8 Inertní plyn	27
2.5 Řídící elektronika a software	27
2.5.1 Řídící elektronika	28
2.5.2 Firmware pro řídící elektroniku	28
2.5.3 Software pro přípravu výrobních dat a řízení přístroje	29
3 Analýza problému a cíl práce	30
3.1 Analýza problému	30
3.2 Cíl práce	30
4 Koncepční řešení	31
4.1 Celkový koncept zařízení	31
4.2 Způsob nanášení prášku	32
4.2.1 Varianta se dvěma zásobníky	32
4.2.2 Varianta se zásobníkem prášku nad komorou	32
4.2.3 Varianta radiálního nanášení prášku	33
4.3 Tvar stavěcího prostoru	33
4.3.1 Obdélníkový průřez	33
4.3.2 Kruhový průřez	33
4.4 Typ laseru a pohyb laserového svazku	34
4.4.1 CO ₂ laser a pohybový mechanismus uvnitř komory	34
4.4.2 Diodový laser a pohybový mechanismus vně komory	34
4.5 Mechanismus pohybu laserového svazku	34
4.5.1 Klasický kartézský mechanismus	34
4.5.2 CoreXY a Hbot	35
4.5.3 Mechanismus Ultimaker	36
4.6 Typ recoateru	37
4.6.1 Břitový recoater	37
4.6.2 Rotační recoater	37
4.7 Experimenty	38
4.7.1 Experimenty s CO ₂ laserem	38
4.7.2 Experimenty s diodovým laserem	41

4.7.4	Zhodnocení a výběr optimální varianty řešení	44
5	Konstrukční řešení	45
5.1	Komora	47
5.1.1	Vzduchotěsnost	49
5.1.2	Tepelná izolace	50
5.1.3	Přívod inertní atmosféry	50
5.2	Mechanismus pohybu v ose Z a výhřev platformy	51
5.2.1	Výpočet převodového poměru a síly potřebné k pohybu platformy	53
5.3	Nanášecí mechanismus	54
5.4	Dávkovací mechanismus	56
5.5	Mechanismus pohybu laseru	58
5.6	Vyhřívací zařízení	60
5.7	Zásobník prášku a odpadní nádoba	62
5.8	Kryty přístroje	63
5.9	Řídicí systém	63
5.9.1	Elektronika	63
5.9.2	Firmware	65
5.9.3	Software	66
5.10	Cenový rozpočet	66
5.11	Ověření funkce	67
5.11.1	Dávkovací mechanismus	67
5.11.2	Nanášecí mechanismus	68
5.11.3	Vyhřívací zařízení	68
5.11.4	Mechanismus pohybu v ose Z a výhřev platformy	69
5.11.5	Mechanismus pohybu laseru	70
5.11.6	Výroba vzorků	71
6	Diskuze	72
7	Závěr	73
8	Seznam použitých zdrojů	74
9	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	76
10	Seznam obrázků a grafů	77
11	Seznam tabulek	79
12	Seznam příloh	80

1 ÚVOD

1

Cílem této práce je konstrukce experimentální 3D tiskárny pro laserové spékání polymerních práškových materiálů. Tiskárna bude využívat technologii selective laser sintering, která umožňuje vyrábět vysoce kvalitní plastové díly. Jelikož se cena některých hlavních komponent tiskárny dostává na úroveň spotřební elektroniky a je také dostupnější pro širší veřejnost, je práce zaměřena na vývoj nízkonákladového zařízení, pomocí kterého bude možné pochopit vliv různých parametrů na proces laserového natavování částic polymerních prášků.

První část práce má formu rešerše a zabývá se podobnými zařízeními pro zpracování práškových materiálů. Dále jsou uvedeny procesní parametry technologie, laserová technologie, materiály a způsob ovládání zařízení.

V další části se práce věnuje samotnému konstrukčnímu návrhu tiskárny. Je zde popsáno několik variant řešení, podle kterých je zvoleno optimální řešení pro realizaci konstrukce. Navržené řešení je detailně popsáno. Následuje diskuze, ve které je zvolené řešení zhodnoceno a práce je ukončena závěrem.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Technologie 3D tisku umožňuje vyrábět součásti a prototypové díly na základě 3D CAD dat. Objekt je vyráběn stylem vrstva po vrstvě, čímž vzniká prostorový díl. 3D tiskem je možné zpracovávat umělé hmoty, keramiku, kovy a kompozity. Na rozdíl od obráběcích strojů, 3D tisk materiál neodebírá, ale přidává, díky čemuž je tato technologie nazývána aditivní. Aditivní technologie prošla evolucí z nástroje určeného pro prototypování, neboli Rapid Prototyping (RP) k produkci použitelných finálních dílů Additive Manufacturing (AM), dříve Rapid Manufacturing. Aditivními technologiemi je možné vyrábět díly s mnohem více komplikovanou geometrií, které by nebylo možné vyrobit technologiemi využívající odebrání materiálu. Taktéž je výhodou to, že nevzniká problém s opotřebením nástroje. Technologie 3D tisku teoreticky umožňuje vyrobit jakýkoli geometrický tvar s vysokou přesností. Aditivní technologie jsou založeny na fotochemické metodě, spékání, nebo tavení laserem, vytlačování materiálu z trysky, lepení vrstev prášku, aj. Velmi vhodným odvětvím pro využití 3D tisku je protetika, jelikož díl je možné připravit přímo na míru pacienta. Společnost Boeing využívá aditivní technologii k výrobě dílů v malé sérii do stíhaček F18 a proudových letadel 787, také je schopna vyrobit sestavu z patnácti dílů jako jeden díl. [1, 2]

2.1 Selective laser sintering (SLS)

Technologie selective laser sintering je aditivní proces výroby, který využívá laser k natavování (sintrování) vrstev práškového materiálu na základě CAD dat. Proces SLS byl vyvinut v rámci diplomové práce Carlem Deckardem na Univerzitě v Texasu a technologie byla patentována v roce 1989. Název selective laser sintering (SLS®) je značka, na kterou se vztahují autorská práva. Oproti jiným polymerním aditivním technologiím má SLS řadu výhod. Nepotřebuje používat podpůrné struktury, které jsou nutné v mnoha jiných aditivních procesech pro podporu převisů a tenkých stěn, jelikož je díl podporován okolním, nespečeným práškem. Díky tomu je možné ve stavěcím prostoru díly umístit nad sebe. Také nevyžaduje požití pojiva, které by přidávalo další post-processing do výrobního procesu a způsobovalo by problém s toxicitou dílů určených pro lékařské účely. Díl vyrobený technologií SLS je možné vidět na obr. 1. [1, 2]



Obr. 1 Díl vyrobený technologií SLS [19]

2.2 Výrobní proces

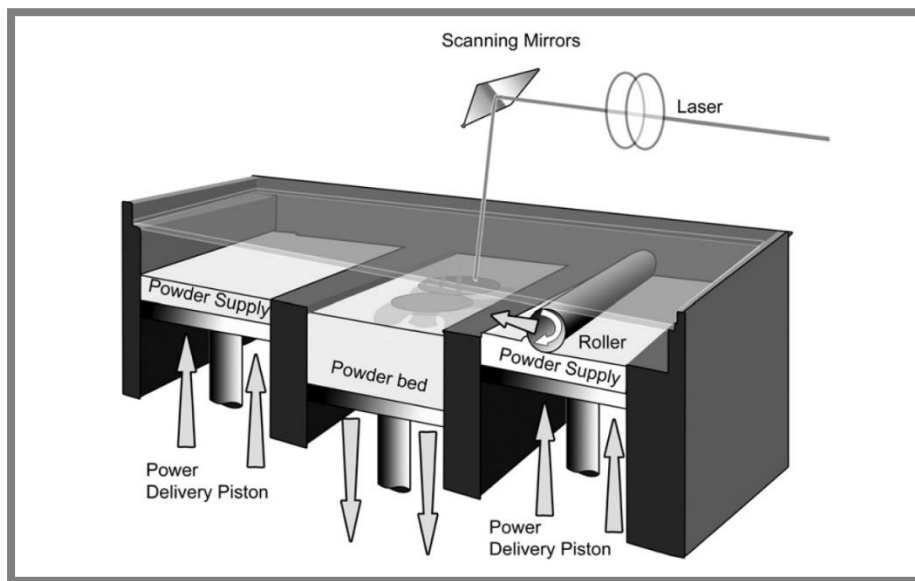
2.2

Díl pro výrobu je reprezentován 3D CAD modelem většinou ve formátu STL. Model je softwarem rozřezán na jednotlivé vrstvy, které představují průřezy dílu. Do stavěcího prostoru je nanесena tenká vrstva prášku. Do vrstvy je v místech průřezu dílu aplikováno počítačově řízeným laserem teplo, které způsobuje natavení a spojení částic prášku. Mezi jednotlivými vrstvami se platforma, na které je díl stavěn, posune o výšku vrstvy dolů a na předchozí sintrovanou vrstvu je nanесena další vrstva prášku. Proces se opakuje pro všechny vrstvy, dokud není vyrobený kompletní díl. Prášek, který není laserem sintrovnán, slouží jako podpora pro další vrstvy. Po dokončení výroby je díl s okolním práškem vyjmut ze stroje. Poté je hotový díl z prášku vyjmut a očištěn. [1]

2.3 3D tiskárny pro práškové materiály

2.3

3D tiskárny pro plastové prášky by se daly rozdělit na profesionální stroje, jejichž cena se pohybuje v řádech milionů korun, a na poloprofesionální stolní stroje s cenou ve statisících korun. Hlavními částmi tiskáren pro práškové materiály jsou laser, systém pohybu a zaostření laserového svazku, vrstvicí mechanismus, stavěcí platforma pod stavěcím prostorem, zásobník prášku a odpadní nádoba. Schématický popis SLS 3D tiskárny je znázorněn na obr. 2. V práci je pro část nanášecího mechanismu, který přichází ke styku s práškem, používán název „recoater“. V případě obr. 2 je tato část ve formě válce.



Obr. 2 Popis hlavních částí SLS 3D tiskárny [1]

2.3.1 Profesionální 3D tiskárny

2.3.1

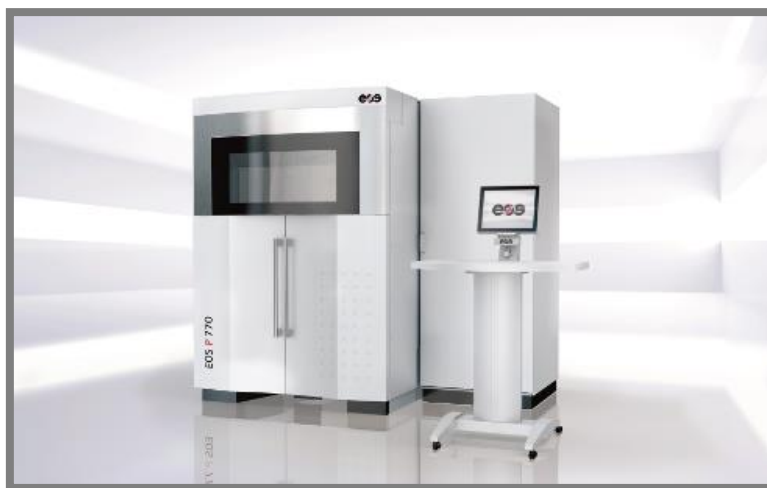
V současné době existuje na trhu řada výrobců, kteří nabízejí 3D tiskárny pro sintrování plastových práškových materiálů. Výrobci zveřejňují pouze velmi stručné parametry jednotlivých přístrojů. Mezi profesionální výrobce se řadí EOS, 3D Systems a čínská společnost Farsoon. Cena profesionálních strojů se pohybuje v řádu milionů korun. Profesionální tiskárny se vyznačují stabilním výrobním procesem a opakovatelností výroby. Stroje jsou vybaveny výhřevem komory, dusíkovým vyvíječem a vzduchovou filtrací.

Hlavním rozdílem v konceptu komerčně dostupných, profesionálních tiskáren je způsob nanášení prášku a vyhřívání. Profesionální stroje většinou využívají zásobníky prášku a odpadní prostor na obou stranách komory, čímž je zrychlena výroba, jelikož se nanášecí mechanismus nemusí vracet do výchozí polohy na jedné straně. [3, 4]

Tiskárny EOS

Výrobce EOS nabízí 4 typy přístrojů pro zpracování plastových prášků. Tato zařízení obsahují dusíkový generátor a pro pohyb paprsku využívají skenovací systém zrcátek a F-theta optiku. Tiskárna EOS P 700 je zobrazena na obr. 3 Katalogové technické parametry je možné vidět v tab. 1. Schéma stroje EOS P 700 je na obr. 4. [3]

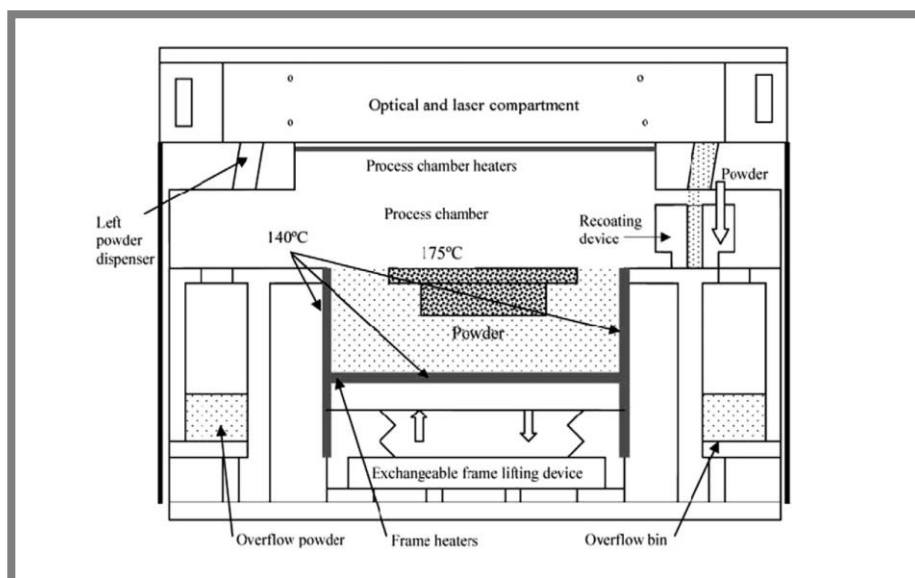
EOS tiskárny používají k nanášení prášku břit. Větší EOS stroje mají odnímatelný stavěcí prostor, který má vyhřívače ve stěnách a stavěcí platformě. Stroj je také vybaven komorovým vyhřívačem, který vyzařuje teplo na prášek ve stavěcím prostoru. Některé řady strojů mají čtyři zářiče kolem stavěcího prostoru. Vyhřívače jsou také v oblasti kolem stavěcího prostoru, kde vyhřívají cirkulující vzduch. Většina komerčních strojů má maximální možnou teplotu okolo 200 °C. Tímto jsou limitované materiály, které je možné zpracovávat. EOS P 800 umožňuje pracovat s maximální teplotou až 385 °C. [1]



Obr. 3 Tiskárna EOS P 770 [3]

Tab. 1 Přehled 3D tiskáren výrobce EOS [3]

Název	Stavěcí objem (mm)	Stavěcí rychlost (mm/h)	Rozsah výšky vrstvy (mm)	Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (m/s)
FORMIGA P 110	200 x 250 x 330	až 20	0,06 - 0,12	30	až 5
EOS P 396	340 x 340 x 600	až 48	0,06 - 0,18	70	až 6
EOSINT P 800	700 x 380 x 560	7	0,12	2 x 50	až 2 x 6
EOS P 770	700 x 380 x 580	až 32	0,06 - 0,18	2 x 70	až 2 x 10



Obr. 4 Schéma 3D tiskárny EOS P700 [1]

Tiskárny 3D Systems

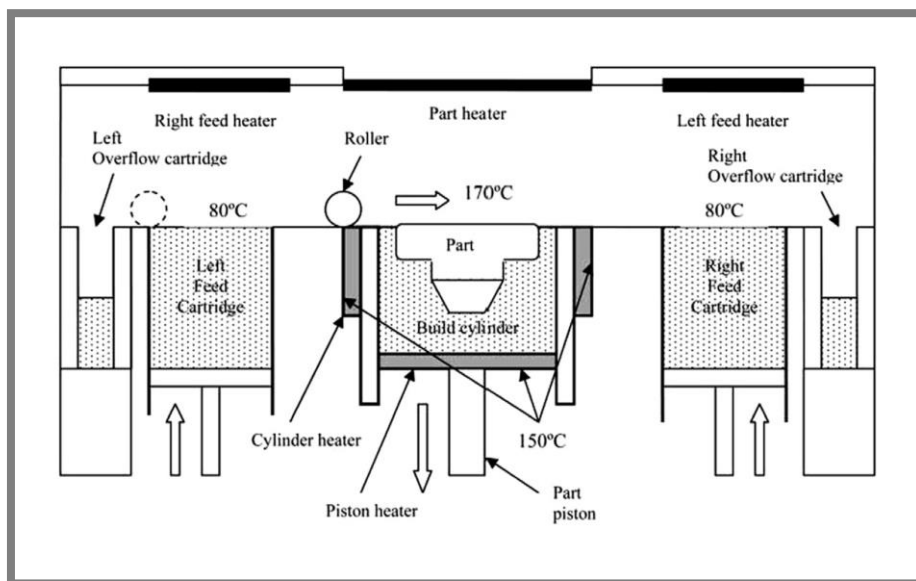
Společnost 3D Systems v současné době nabízí 4 typy přístrojů. Parametry zařízení, které výrobce zveřejňuje, je možné vidět v tab. 2. Stroje 3D Systems používají k nanášení prášku válec rotující proti směru pohybu. Nanášecí zařízení ve formě protiběžného rotačního válce je více tolerantní k nedokonalé nanesené předchozí vrstvě a také méně vytrhává díl ze stavěcího prostoru než nanášecí břit. Tiskárny 3D Systems předehřívají prášek v zásobnících prášku. Stavěcí prostor má vyhřívanou stavěcí platformu a stěny. Nad každým zásobníkem prášku a stavěcím prostorem jsou tepelné zářiče. Tiskárna 3D Systems sPro 230 je zobrazena na obr. 5. Schéma stroje 3D Systems Sinterstation na obr. 6. [1]



Obr. 5 Tiskárna 3D Systems sPro 230 [4]

Tab. 2 Přehled 3D tiskáren výrobce 3D Systems [4]

Název	Stavěcí objem (mm)	Rychlost stavby (l/hod)	Rozsah výšky vrstvy (mm)
ProX SLS 500	381 x 330 x 460	1,8	0,08 – 0,15
sPro 60 HD-HS	381 x 330 x 460	1,8	0,08 – 0,15
sPro 140	550 x 550 x 460	3,0	0,08 – 0,15
sPro 230	550 x 550 x 750	3,0	0,08 – 0,15



Obr. 6 Schéma tiskárny 3D Systems Sinterstation [1]

2.3.2 Stolní tiskárny

2.3.2

Sharebot SnowWhite

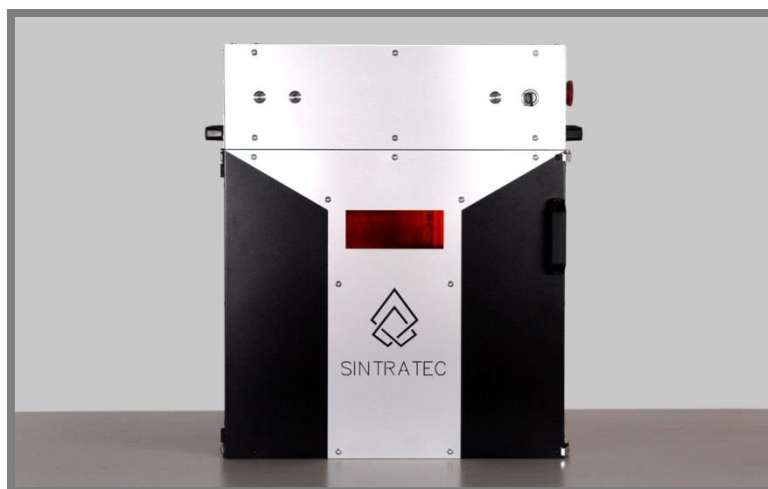
3D tiskárna Sharebot SnowWhite, vyvinutá v Itálii, umožňuje zpracovávat termoplastické prášky typu PA12, PA11 a TPU. Dále pak kompozitní prášky s příměsí skla nebo karbonu. Skenovací rychlost laseru je až 2200 mm.s^{-1} , to umožňuje rychlost stavby až 35 mm.h^{-1} výšky. Jedná se spíše o laboratorní zařízení vhodné pro malé díly a experimentální výzkum materiálů. V zařízení se nachází 14W CO₂ laser. Jedná se o zařízení v hodnotě půl milionu korun. Fotografie této tiskárny je na obr. 7. [5]



Obr. 7 SLS 3D tiskárna Sharebot SnowWhite [5]

Sintratec

Zařízení Sintratec, vyvinuto ve Švýcarsku, bylo představeno jako první SLS 3D tiskárna pod 5000 euro. Umožňuje tisknout z černého, světle šedého nylonu a nylonu plněného hliníkem. Maximální stavěcí objem tiskárny je (130 x 130 x 130) mm. Rychlost tisku je 10 mm za 0,5 až 1 hodinu. K sintrování využívá diodový laser s vlnovou délkou v modrém spektru s rychlostí pohybu až 650 mm.s^{-1} . Tiskárna se prodává v nesloženém stavu. Toto zařízení je zobrazeno na obr. 8. [6]

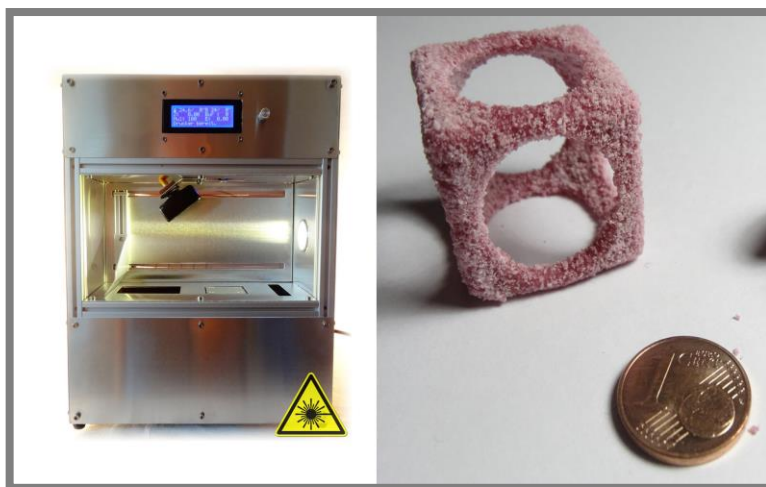


Obr. 8 SLS 3D tiskárna Sintratec [6]

2.3.3 Nekomerční tiskárny

JRLS 1000 DIY SLS-3D-Printer

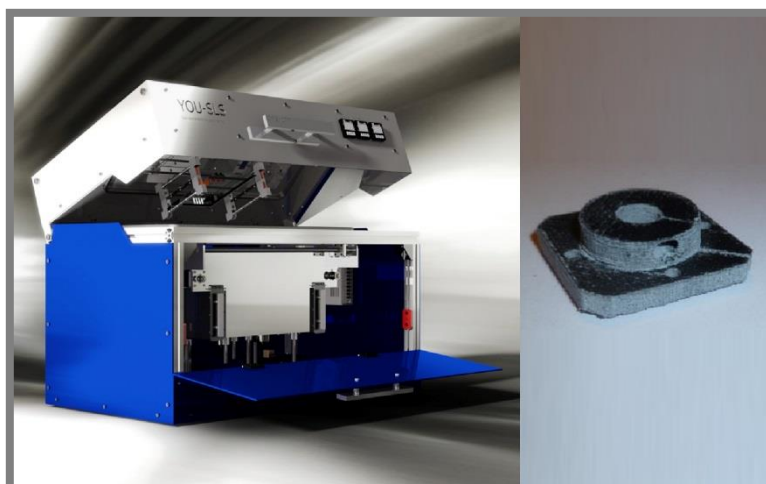
Na serveru Instructalbes.com byl představen projekt SLS 3D tiskárny vytvořený studentem z Německa. Jako materiál pro tisk byl použit instantní čaj. Mechanika tiskárny je vytvořena převážně z vytisknutých dílů technologií FDM, hliníkových profilů a plechů a dřevěných nábytkářských překližek. Je použit 1,8W laserový modul s vlnovou délkou 445 nm. Pro pohyb laseru je použit klasický kartézský mechanismus. V zařízení se nachází 80W výhřev stavěcí platformy a 150W výhřev prášku. Elektronika je tvořena Arduinem a Ramps 1.4. Konstrukci zařízení společně s výrobkem je možné vidět na obr. 9. [7]



Obr. 9 SLS 3D tiskárna ze serveru Instructables [7]

You-SLS

Na serveru indiegogo.com byl zveřejněn projekt 18letého německého studenta, který měl za cíl vytvořit opensource SLS tiskárnu. V tiskárně se nachází diodový laser s výkonem 2 W a vlnovou délkou 445 nm a vyhřívaná komora. Tiskárna je řízena Arduinem s Ramps 1.4. Navržené zařízení je na obr. 10. [8]



Obr. 10 SLS 3D tiskárna You-SLS [8]

2.4 Procesní parametry

Při konstrukci SLS 3D tiskárny pro zpracování plastových práškových materiálů, je nutné brát ohled na řadu procesních parametrů, které mají vliv na zpracovatelnost materiálu a výslednou kvalitu výrobku. Selective laser sintering je komplexní proces, na který má vliv více než 130 parametrů. V procesu lze nalézt vědní disciplíny jako laserová optika či materiálové vědy. Během procesu sintrování prášku probíhají různé fyzikální děje jako absorpce a rozptyl laserového záření, přenos tepla a chemické reakce. Výsledné vlastnosti výrobku závisí na kvalitě každé sintrované linie a jednotlivé vrstvy. [9]

Z důvodu velkého množství parametrů, které ovlivňují kvalitu výrobku, se na procesní parametry pro jednotlivé typy materiálů dochází při empirických testech. Tab. 3 obsahuje procesní parametry, které mají na výrobní proces největší vliv. Nejdůležitějšími procesními parametry jsou výkon a typ laseru, skenovací rychlost a tloušťka vrstvy prášku. [9, 10]

Tab. 3 Procesní parametry ovlivňující výrobní proces [9, 10]

Laser	Skenování	Prášek	Prostředí
Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Teplota stavěcí platformy
Typ laseru	Skenovací rozteč	Teplota tání	Teplota v komoře
Průměr stopy paprsku	Skenovací strategie	Viskozita	Vlhkost
Distribuce intenzity		Povrchové napětí	
		Velikost a distribuce částic	
		Tvar částic	
		Absorptivita a reflektivita	

2.4.1 Laserová technologie

Slovo laser vzniklo z anglického spojení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu zesilování světla stimulovanou emisí záření. Označuje tak zařízení, které generuje elektromagnetické záření optickým zesilováním, a to díky procesu stimulované emise fotonů. Základem každého laseru je aktivní prostředí, které je buzeno opticky, elektricky, nebo chemicky. Toto buzení dodává energii, která je následně vyzařena ve formě laserového svazku. Princip vyzařování je takový, že atom při přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší vyzaří energii ve formě fotonu. Všechny vyzařené fotony mají stejnou energii, směr, polarizaci i fázi, z čehož plynou tři základní vlastnosti laseru. Laserový svazek je kolimovaný, tzn., že se v principu nerozsbíhá. Také je monochromatický, tedy jednobarevný a koherentní, proto jsou jeho fotony ve stejné fázi, a to jak časově, tak prostorově. [9, 11]

Lasery se nejčastěji dělí podle aktivního prostředí na plynové, pevnolátkové, vláknové, diodové, chemické, excimer a barvičkové lasery. Také je možné lasery dělit podle typu výstupu svazku. Kontinuální (CW) lasery generují souvislý výstupní výkon. Pulzní lasery generují výkonové pulzy s délkou v řádu ns, nebo ms. Speciální

tzv. ultra-rychlé lasery generují pulzy s délkou v řádech ps až fs. Dále je možné lasery dělit podle vlnové délky na infračervené, lasery s vlnovou délkou v oblasti pro člověka viditelného spektra, ultrafialové a rentgenové. Každý typ laseru má své aplikace, pro které je vhodný. První sestrojený laser byl rubínový, ale zanedlouho byl nahrazen vhodnějšími typy pevnolátkových laserů. V současnosti je nejrozšířenější neodymoval laser, který se označuje jako Nd:YAG. [9, 11]

CO₂ laser

CO₂ laser se řadí mezi lasery plynové. Zdrojem laserového paprsku je obvykle trubice naplněna směsí vzácných plynů a CO₂. Aktivní prostředí se po určité době provozu znehodnotí a je potřeba ho vyměnit. Životnost CO₂ trubice bývá obvykle 10 000 hodin provozu. Lasery mohou být buzeny buďto radiofrekvenčně, nebo elektrickým výbojem. Výkony CO₂ laserů se pohybují od 10 W do desítek kilowat. U nízkých výkonů jsou prostory s plynem hermeticky uzavřené. U výkonů pohybujících se v desítkách kilowat proudí plyn neustále rezonátorem. Na koncích trubice jsou umístěna rovnoběžná zrcátka, přičemž jedno je polopropustné. Vystupující laserový paprsek se záměrně rozšiřuje z důvodu následného lepšího zaostření čočkou. Optický svazek CO₂ laseru není možné vést optickým vláknem. Pro vedení se využívají optická zrcadla. CO₂ trubice je schopna vytvořit laserový svazek až při 7-8 % maximálního výkonu. Průřez svazku má kruhový tvar. Trubice CO₂ laseru musí být chlazena, aby nedošlo k jejímu přehřátí. Chlazení může být vzduchem, nebo vodou. CO₂ trubice je napájena zdrojem vysokého napětí. Největšími výrobci CO₂ laserů jsou firmy Coherent, Roфин, Trumpf a Synrad. Kvůli poměrně velké vlnové délce se CO₂ lasery používají spíše pro makromolekulární struktury a organické látky. [11–13]

Diodový laser

Aktivní prostředí v diodových laserech představuje přechod PN. V současnosti nejvíce používaným rezonátorem je v diodových laserech Fabry-Perotův rezonátor. Vlnová délka diodového laseru bývá v rozmezí 400 nm až 980 nm. Výkon laseru je možné spojitě regulovat v celém jeho rozsahu. Průřez laserového svazku je obdélníkového tvaru. [11, 14]

Bezpečnost při práci s laserem

Lasery se dělí podle tříd bezpečnosti na třídu 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B a 4. Při práci s laserem je nutné používat ochranné brýle, jelikož laserové záření může mít značně škodlivé účinky na lidský zrak. Faktor ochranných brýlí bývá obvykle udáván v podobě: DIR 1050–1400 LB5, kde první písmena udávají typ provozu laseru, ke kterému se ochranný faktor vztahuje. Význam písmen je následující:

D: kontinuální lasery (CW) pro čas vystavení větší než 0,25 s

I: impulsní lasery s délkou pulzu mezi 1ms a 0,25 ms

R: pulzní lasery s délkou pulzu mezi 1 ns a 1 ms

M: pulzní lasery s délkou pulzu menší než 1 ns

Dále je udán rozsah vlnových délek laserového záření v nanometrech, ke kterému se ochrana vztahuje. Poslední část popisu udává třídu ochrany brýlí. Číslo je v rozmezí hodnot 1-10 a představuje účinnost zeslabení hustoty laserového výkonu. Účinnost roste s rostoucím číslem. Každý stupeň ochrany představuje 10krát větší zeslabení hustoty. Při výběru brýlí je dále třeba brát v úvahu i velikost průřezu laserového svazku. [15]

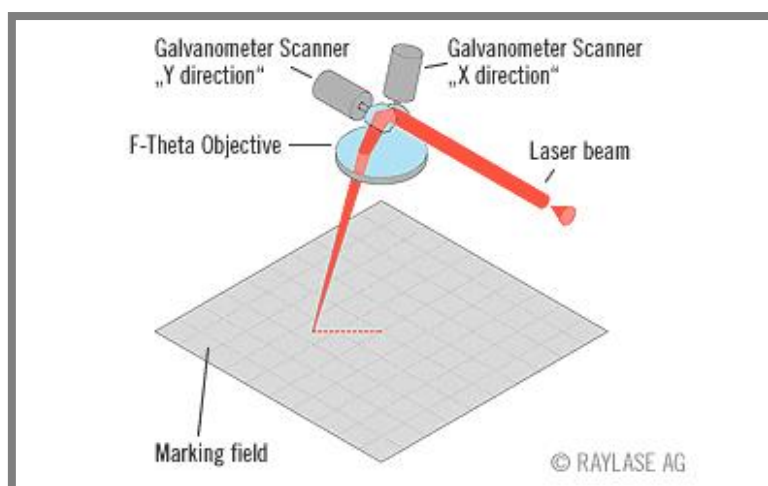
2.4.2 Pohyb laserového svazku

2.4.2

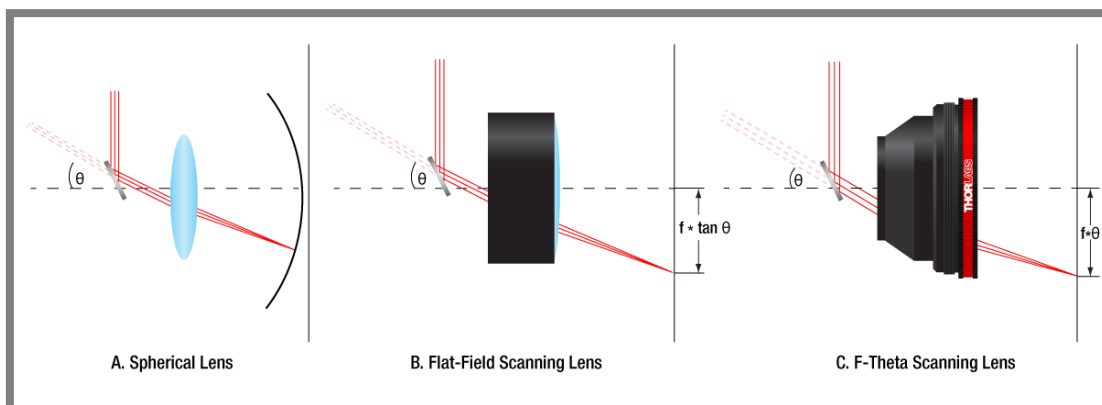
Skenovací systém a F-Theta optika

První způsob pohybu laserovým svazkem je skenovací systém zrcadel a F-Theta optika. Tento způsob se výhradně používá u komerčních 3D tiskáren pro práškové materiály. Také se vyskytuje u laserových popisovacích zařízení. Systém využívá pro pohyb laserového svazku dvě naklápěcí zrcadla, uchycená na navzájem kolmých osách galvanometrů. Na obr. 11 je schematické znázornění tohoto systému. Galvanometr je zařízení, které je možné nalézt v přístrojích pro měření elektrického proudu, kde se osa galvanometru natáčí úměrně elektrickému proudu. Výhodou tohoto řešení jsou nízké setrvačné síly.

Ohnisko laserového svazku se při použití skenovacího systému pohybuje po kulové ploše. Pro zaostření svazku na pracovní plochu je použit optický systém čoček zvaný F-Theta optika. Srovnání F-Theta optiky se sférickou čočkou a s plochou skenovací optikou je na obr. 12. F-Theta optikou se vzdálenost dopadajícího svazku mění s úhlem natočení zrcadel. Přesnost pohybu bývá, v závislosti na hloubce zaostření, v řádu desítek mikrometrů. Poloha dopadajícího svazku je přímo úměrná úhlu natočení zrcadla skenovacího systému. [15]



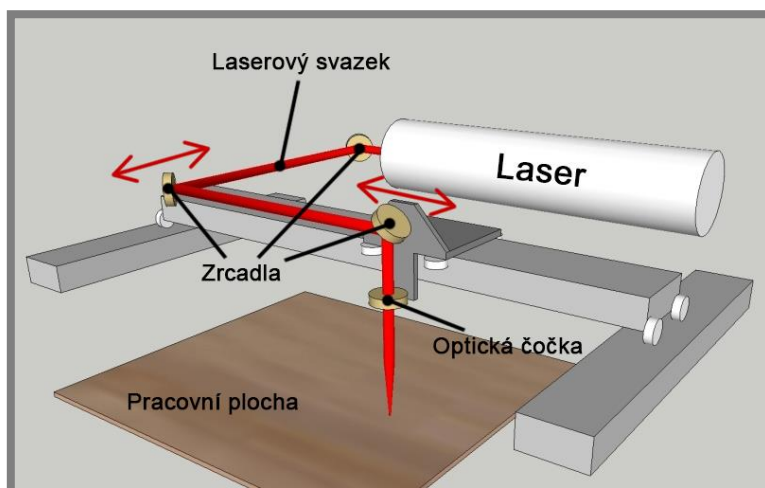
Obr. 11 Skenovací systém s F-Theta optikou [20]



Obr. 12 Srovnání optických členů pro zaostření laserového svazku [15]

Systém pohyblivých zrcadel

Tento způsob se využívá u větších rozsahů pohybu laseru, nebo u laserů, které není možné vést optickým kabelem. Schématické znázornění mechanismu pro pohyb zrcadel je na obr. 13. Systém obsahuje na sebe kolmá zrcadla, přičemž dvě zrcadla jsou umístěna na pohyblivém se mechanismu. Za posledním zrcadlem je umístěna čočka, kterou je svazek zaostřen do pracovní roviny. [16]



Obr. 13 Mechanismus pro pohyb zrcadel [16]

2.4.3 Materiály

Teoreticky je možné laserovým sintrováním zpracovat jakýkoliv typ polymeru, který je ve formě prášku. Prakticky to však možné není, protože na úspěšnou stavbu dílu má vliv řada faktorů. Největší roli má rozdílné tepelné chování materiálů. Pro vstřikování je možné použít desítky tisíc materiálů, ale pro laserové sintrování je dostupných méně než 30 materiálů. Tyto materiály jsou termoplasty založené na Polyamidech PA12 a PA11. Novější materiály jsou Polypropylen a PEEK. Pevnost v tahu a modul pružnosti dílů vyrobených laserovým sintrováním jsou srovnatelné s díly vyrobenými vstřikováním. Společnosti, které vyrábí práškové materiály určené k sintrování, jsou EOS, 3D Systems, Advanced Laser Materials a Farsoon. [1]

Nejčastěji používaný materiál je semikrystalický termoplast, polyamid PA 12 s triviálním názvem nylon. Jeho teplota tavení je 176 °C, modul pružnosti sintrovaného materiálu 1600 MPa, pevnost v tahu 48 MPa a hustota 930 kg.m⁻³. Průměrná hustota sintrovaných dílů z materiálu PA12 bývá (950 až 1000) kg.m⁻³. Hustota vstřikovaných dílů z tohoto materiálu je 1040 kg.m⁻³. [1]

Dále existují materiály, v nichž je do základního polymeru přimíchán jiný druh materiálu a vzniká tak kompozit. Polyamid PA12 plněný hliníkovým práškem se nazývá Alumid a má kovově šedou barvu. Poměr komponent ve směsi je možné spočítat ze známých hustot materiálů. Hustota PA12 je 930 kg.m⁻³. Hustota hliníku s označením AlSi10, který je nejčastěji využíván v SLM technologii je 2670 kg.m⁻³ a hustota Alumidu je 1360 kg.m⁻³. Pomocí těchto hodnot lze spočítat, že objemový podíl PA12 je 75,3 % a hliníku 24,7 %. U hmotnostního podílu je to pak 51,5 % PA12 a 48,5 % hliníku. Mezi další kompozity se řadí CarbonMide, polyamid plněný uhlíkovými vlákny s barvou výsledného dílu antracitově černou a polyamid plněný skelnými vlákny či mědí. Procesní parametry i výsledné vlastnosti kompozitních dílů jsou velmi podobné parametrům základního polyamidu. [13]

Mnoho kompozitních materiálů pro laserové sintrování bývá připravované mechanickým mísením plniva a základního materiálu. Další metodou je smáčení plniva v základním materiálu. Díly vyrobené z hliníkového prášku a prášku PA12 připraveného metodou mísení mají nižší pevnost než díl vyrobený ze základního materiálu. Naopak díly z prášku připraveného máčením mají vyšší pevnost než základní materiál. [1]

Pro laserové sintrování větších dílů je ideální velikost částic pro dobrou zpracovatelnost obvykle mezi 40 až 90 μm . Malé částice v prášku vyplňují mezery mezi velkými částicemi, čímž zvyšují hustotu prášku při zachování dobré tekutosti. Tekutost je v procesu laserového sintrování velmi důležitá, protože umožňuje nanést tenkou, konzistentní, zhutněnou a hladkou vrstvu prášku. Pro dobrou tekutost prášku je také zásadní, aby byl prášek suchý. Míra vhodné vlhkosti závisí na typu prášku. EOS například doporučuje vlhkost 30 % pro materiál PA12. Na tekutost prášku má také vliv elektrostatický náboj. Částice prášku se obvykle elektrostaticky nabíjí během prosévání a manipulace. Typické výšky vrstvy používané v laserovém sintrování odpovídají 2-3 násobku průměrné doporučené velikosti částic a obvykle bývají 0,1 mm, nebo 0,15 mm. [1]

2.4.4 Vyhřívání prášku

2.4.4

Během procesu laserového sintrování jsou polymery ohřáty na vysoké teploty, které způsobují změnu z pevného, nebo skelného stavu při pokojové teplotě na viskózní tekutou taveninu. Teploty, při kterých tato změna probíhá, závisí na typu polymeru a má nejvýznamnější vliv na zpracovatelnost materiálu. Výrobní komora je udržována při teplotě těsně pod bod tavení prášku a laser tuto teplotu mírně zvýší za účelem sintrování. Pro úspěšný proces je nutné, aby polymerní prášek byl zahříván dostatečně dlouhou dobu před stavbou dílu, během stavby, a také po skončení stavby. Pro semikrystalické polymery je teplota předehřevu běžně těsně pod teplotu tavení. Předehřev prášku na vysokou teplotu je vhodný proto, že je tak možné použít menší množství energie aplikované laserem. Také se sníží teplotní gradient mezi sintrovaným a nesintrovaným práškem. U semikrystalických plastů předehřev prášku snižuje kroucení, které vzniká během chlazení dílu. [1]

Pokud je teplota prášku příliš nízká, začne docházet ke kroucení rohů a hran dílů směrem nad vrstvu prášku. V nejhorším případě může dojít k posunutí dílu v prášku nanášecím zařízením. V případě, že je teplota prášku příliš vysoká, začne kolem dílu tvrdnout, vyjmutí dílu je náročnější a sníží se jeho recyklovatelnost. Prášek se také může natavit na vyráběný díl, sníží tak přesnost dílu a zhorší povrch. Další problém s kroucením sintrované vrstvy může nastat v případě, že teplota nově naneseného prášku je příliš nízká vůči teplotě předchozí vrstvy. Před vytáhnutím vyrobeného dílu z prášku je vhodné, aby prášek spolu s dílem kontrolovatelně vychládl do pokojové teploty. Pokud by byl díl z prášku vytáhnut příliš brzy, mohlo by dojít ke zkroucení dílů vlivem vysokého tepelného gradientu. Teplota prášku nemá vliv pouze na kroucení dílu, ale i na mechanické vlastnosti. Při vyšší teplotě prášku mají díly vyšší hustotu než při teplotě nižší. Avšak geometrická přesnost je horší při vyšších teplotách. Proto je potřeba najít kompromis. [1]

Teplota prášku by měla být pro dokonale krystalický polymer 3-4 °C pod teplotu tavení polymeru. Zcela krystalický materiál je pouze teoretický a reálný materiál je semikrystalický. Z toho důvodu vznikl empirický přístup, který například pro materiál PA12 říká, že se má teplota prášku postupně zvyšovat, než se začne prášek

lesknout. Od této teploty se poté odečte 12 °C, čímž se určí teplota prášku během procesu. [1]

2.4.5 Degradace prášku

Vlivem poměrně dlouhé doby, při které se materiál udržuje při vysoké teplotě dochází ke stárnutí materiálu. Během tisku dochází často po několik hodin k zahřívání okolního prášku kolem vyráběného dílu na teploty těsně pod teplotu tavení a dochází tak k degradaci materiálu. Vzhledem k poměrně vysoké ceně prášku je žádané prášek znovu použit. U většiny materiálů však není možné znovu použít 100 % prášku. Při stavění z použitého prášku dochází ke změně vlastností jako kroucení a drsnost povrchu. Proto se použitý prášek mísí s novým. Pro standardní prášky PA12 je typické 40% použití již použitého prášku. Směs použitého a nového prášku má vliv na proces stavby, který je odlišný od procesu stavby čistě s novým práškem, či jen s použitým. [1]

2.4.6 Kvalita dílu

Výsledná kvalita dílu se hodnotí podle řady kritérií. Nejčastěji je hodnocena relativní hustota, pórovitost materiálu a drsnost povrchu. Kvalitu výsledného dílu ovlivňuje z velké části také způsob pohybu laserového svazku po povrchu naneseného prášku. V největší míře závisí na skenovací rychlosti a rozteči jednotlivých tras laseru. Vliv má také skenovací strategie, kterou je vyplňován vnitřek kontury dílu. [1, 9]

Přesnost dílu bývá v procesu SLS ovlivněna především kroucením při chladnutí polymeru. Tento problém je typický pro semikrystalické polymery z důvodu seskupování polymerních řetězců během krystalizace, čímž dochází ke zmenšování objemu. Kroucení je dáno materiálovými vlastnostmi, teplotou stavěcí platformy, vlastnostmi laseru, rychlostí chladnutí, velikostí a geometrií dílu. Kroucení se zvětšuje se zvětšující se skenovací rychlostí a skenovací roztečí. Zmenšuje se se zvětšující tloušťkou vrstvy, výkonem laseru, teplotou stavěcí platformy a s časem prodlení. Čím větší vzniká gradient mezi skenovanou vrstvou a okolním práškem, tím větší může nastat zkroucení dílu. [1]

Kvalita povrchu dílu je také ovlivněna tzv. schodovitým efektem, který je typický pro všechny aditivní technologie, využívající nanášení vrstev. Díly vyrobené laserovým sintrováním mají, stejně jako díly vyrobené jinými aditivními technologiemi, anizotropní vlastnosti. Vyrobený díl má v ose kolmé na vrstvy nižší pevnost než v osách rovnoběžných. [1]

2.4.7 Hustota energie laseru

Pro každý materiál existuje optimální hustota energie, která bývá určená na základě empirických testů. Plošná hustota energie (ED – energy density) je funkcí výkonu laseru (LP – laser power), skenovací rozteče (SS – scan spacing) a skenovací rychlosti (BS – laser scan speed) a bývá vyjádřena rovnicí:

$$ED = \frac{LP}{SS \times BS} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-2}\text{)} \quad (1)$$

Při skenování může docházet k navýšení energie na začátku a konci skenovací linie vlivem zrychlení a zpomalení laserového svazku. Tento jev se nazývá skywritting.

Během skenování dochází k překrývání předchozích skenovaných linek. Tímto dochází k ozáření některých míst vícekrát. Doporučuje se, aby skenovací rozteč byla 3-6krát menší než průměr laserového svazku, aby bylo kompletní spojení celého průřezu. Průměr dopadajícího laserového svazku bývá u komerčních strojů (0,5 až 0,7) mm. Výkon a rychlost laseru bývá rozdílná pro vnitřní a vnější kontury dílu. [1].

2.4.8 Inertní plyn

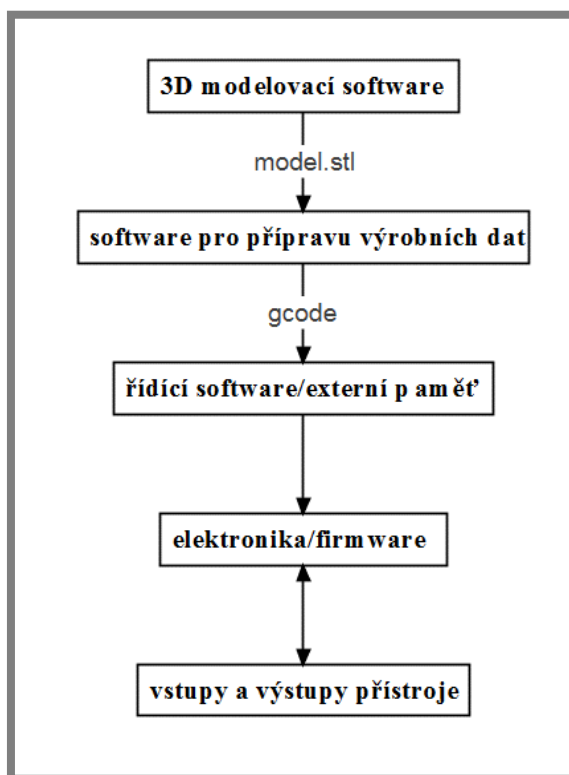
2.4.8

Při procesu výroby dílu z plastového prášku je vhodné zajistit inertní atmosféru uvnitř komory, která pomáhá snížit oxidaci materiálu během natavování prášku. V zařízení často bývá vytvořeno proudění inertního plynu těsně nad stavěcí platformou, což umožňuje odvádění vzniklých nečistot z atmosféry. Podíl kyslíku v atmosféře se pohybuje kolem hodnoty 0,2 %. Přetlak vzniklý uvnitř komory tlakem inertního plynu se pohybuje kolem 10 mbar. [9]

2.5 Řídicí elektronika a software

2.5

Pro přípravu výrobních dat, ovládání přístroje a jeho řízení během výrobního procesu je nezbytné použít řadu softwarů a řídicí systém. Schéma procesu řízení stroje je možné vidět na obr. 14. Možným řešením pro SLS 3D tiskárnu je řídicí systém, vyvinutý v rámci projektu RepRap. Cílem projektu bylo vyvinutí open-source FDM 3D tiskárny. V rámci projektu byla vyvinuta řada elektronických obvodů založených na platformě Arduino, které umožňují tiskárnu řídit. Také byly vyvinuty softwary, určené pro přípravu výrobních dat a ovládání přístroje. [17]



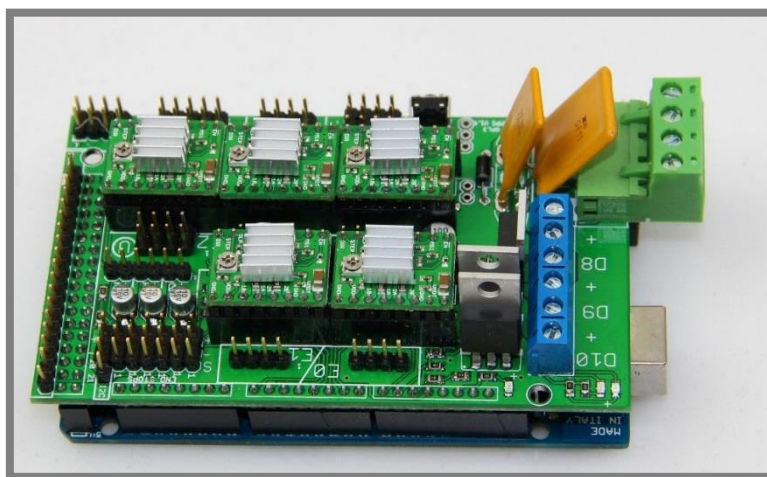
Obr. 14 Schéma řídicího procesu

2.5.1 Řídící elektronika

Pro řízení FDM 3D tiskárny byla vyvinuta řada řídící elektroniky. Jelikož bude nutné částečně modifikovat elektroniku a firmware, jsou v následujících odstavcích popsány pouze dvě nejběžnější řídící elektroniky, o kterých je možné zjistit nejvíce informací, a jsou poměrně snadno modifikovatelné. Řídící elektronika obsahuje obvody pro řízení krokových motorů, vyhřívání stavěcí podložky a tavící trysky, měření teploty, koncové spínače os a řadu dalších. [17]

Ramps 1.4

Tato elektronika slouží jako tzv. shield, pro připojení k Arduino Mega 2560, či k výkonnějšímu Arduino Due. Deska má připravené sloty pro 5 driverů krokových motorů. Novější verze driverů pro tuto desku s označením DRV8825 umožňuje až 32 mikrokroků na jeden krok. Sestava Arduina Mega 2560, Ramps 1.4 s pěti drivery A4988 pro krokové motory je zobrazena na obr. 15. [17]



Obr. 15 Řídící elektronika Ramps 1.4 [21]

Rambo 1.3 - ultimachine

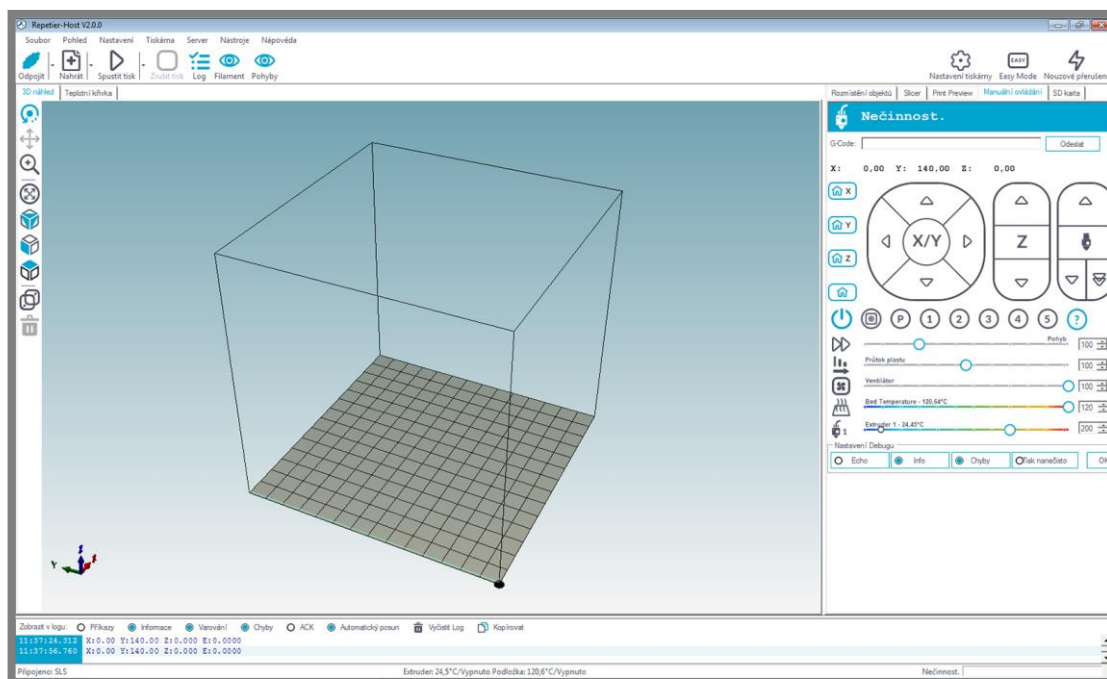
Tato elektronická deska má stejný typ mikročipu jako Arduino. Také umožňuje připojení stejného typu a množství periférií jako Ramps 1.4. Její výhodou však je, že veškeré prvky jsou osazené na jednom plošném spoji. Deska poskytuje 5 integrovaných driverů pro krokové motory, které umožňují 16 mikrokroků na jeden krok. Nevýhodou této elektroniky je její poměrně vysoká cena a dostupnost. [18]

2.5.2 Firmware pro řídící elektroniku

Pro řízení 3D tiskáren s AVR procesory, tedy stejnými jako využívá Arduino, byla vyvinuta řada firmwarů, které pracují na stejné bázi a liší se pouze doplňujícími funkcemi pro ovládání přístroje. Mezi nejrozšířenější firmwary v oblasti RepRap patří Marlin-Firmware a Repetier-Firmware. Firmware umožňuje na základě g-kódu ovládat pohony a řídit veškeré procesy tisku. Také umožňuje připojení modulu SD karty a displeje. S tímto modulem není nutné mít připojený počítač. Výrobní data lze číst z SD karty a tiskárnu je možné ovládat pomocí uživatelského prostředí na displeji. [17]

2.5.3 Software pro přípravu výrobních dat a řízení přístroje

Software pro přípravu výrobních dat vytváří dráhu trysky a další pokyny pro řízení tiskárny v podobě g-kódu. Nejrozšířenějším softwarem pro přípravu výrobních dat v projektu RepRap je Slic3r, ve kterém je možné nastavit veškeré procesní parametry pro tisk metodou FDM. Software pro řízení přístroje umožňuje uživateli ovládat osy přístroje, teploty výhřevu a je schopný graficky zobrazovat stav výrobního procesu. Takovýmto softwarem je například Pronterface. Některé softwary kombinují oba předchozí. Jsou to Repetier-Host, který má Slic3r integrovaný ve formě pluginu, Cura a komerční Simplify 3D. Rozhraní softwaru Repetier-Host je na obr. 16. [17]



Obr. 16 Rozhraní softwaru Repetier-Host

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

V současné době se na trhu vyskytují profesionální stroje, jejichž cena se pohybuje v řádu milionů korun. V posledních letech se začínají objevovat levnější stroje, s cenou se pohybující se ve sta tisících korun. Řada konstruktérů se také snaží o výrobu opensource SLS 3D tiskárny.

SLS 3D tiskárna je komplexní zařízení, ve kterém je třeba řešit mechanickou konstrukci, laserovou optiku, tepelný výhřev a izolaci, přívod inertního plynu, vzduchovou izolaci, elektroniku a software. Hlavním problémem je určení vhodného typu laseru pro toto zařízení a také způsob pohybu laserového svazku. S tím souvisí dopravení laserového svazku do místa sintrování prášku, jelikož komora musí být vyhřívána a zdroj laserového svazku se tak nemůže nacházet uvnitř. Vzhledem k požadavku na nízkou cenu zařízení není možné v přístroji používat stejné prvky, které využívají profesionální tiskárny. Tyto prvky budou za cenu rychlosti stavby a kvality vytisknutého dílu nahrazeny levnějšími.

Vzhledem k ceně je možné použít pouze CO₂ laserovou trubici, nebo diodový laser. Veškeré profesionální 3D tiskárny určené pro zpracování plastových prášků využívají CO₂ laser a galvanometrický skenovací systém s F-Theta optikou. CO₂ laser se využívá, protože pro svoji vlnovou délku 10,6 μm je nejvhodnější pro sintrování polyamidových prášků. Diodový laser má velmi kompaktní rozměry a jeho svazek pronikne přes tabulové sklo. Vlnová délka laseru však není příliš vhodná pro sintrování plastových prášků.

Kromě laseru hraje v procesu SLS důležitou roli také teplota v částech přístroje. Z toho důvodu bude nutné vymyslet vyhřívání nanesené vrstvy prášku a stavěcího prostoru přístroje. Z důvodu experimentálního ověření vlivu inertní atmosféry na oxidaci materiálu během výroby bude také nutné vytvořit přívod inertního plynu a komoru přístroje vzduchově utěsnit.

Elektronika i software pro pohyb třech mechanických os, výhřev a řízení podobných strojů jsou v současné době již vyvinuty a dobře popsány. Jedním z takových systémů je opensource projekt FDM 3D tiskáren vyvinutý komunitou RepRap, který nabízí již hotové řešení řídicí elektroniky, firmwaru a softwaru. Tento systém tedy bude pouze upraven a použit pro daný typ zařízení.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je konstrukce 3D tiskárny pracující na principu laserového spékání polymerních práškových materiálů. Cílem je návrh a realizace nízkonákladové experimentální 3D tiskárny, která bude schopna metodou selective laser sintering zpracovávat polyamidové prášky.

Dílejší cíle práce jsou:

- Definice hlavních procesních parametrů
- Návrh variant řešení
- Konstrukce a realizace výroby
- Ověření funkce tiskárny

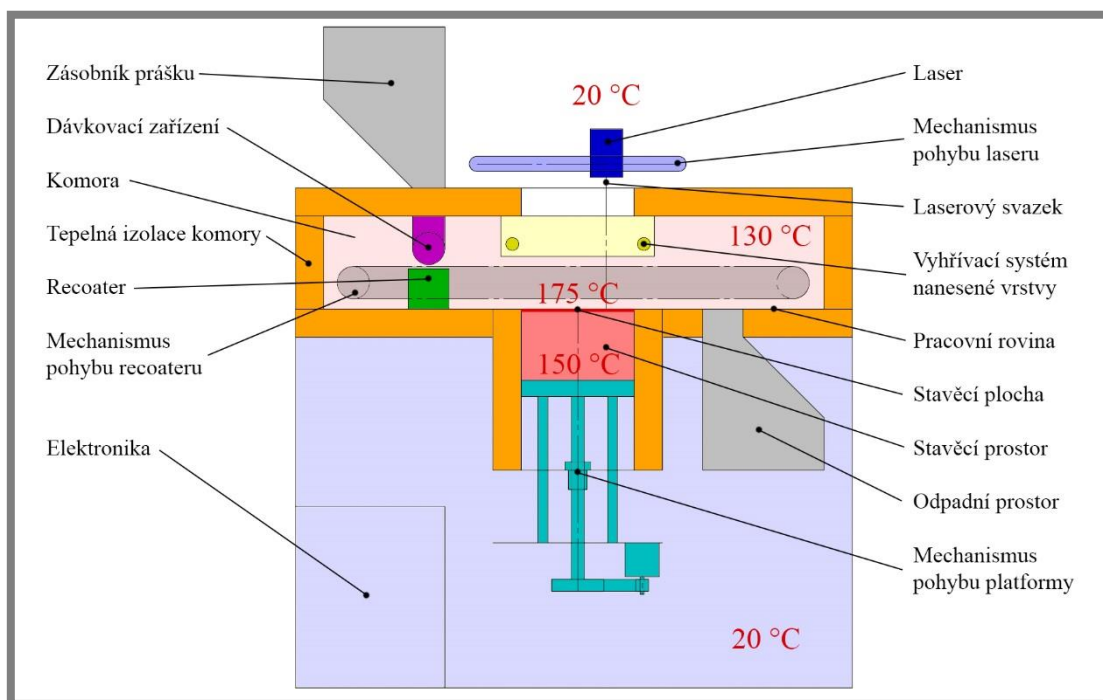
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4

4.1 Celkový koncept zařízení

4.1

Schématické znázornění konceptu přístroje je na obr. 17. Mechanismus pro pohyb platformy v ose Z posune platformu o požadovanou výšku vrstvy dolů. Dávkovacím prškem je ze zásobníku pršku do recoateru nanesen pršek. Recoater nanese vrstvu pršku na stavěcí platformu a přebytek pršku přesune do odpadního prostoru. Vyhřívací systém zahřeje nanesenou vrstvu na teplotu kolem 170 °C. Poté laser spéká nanesený pršek v místech průřezu budoucího dílu. Proces se opakuje za neustálého vyhřívání stavěcího prostoru na teplotu 150 °C.

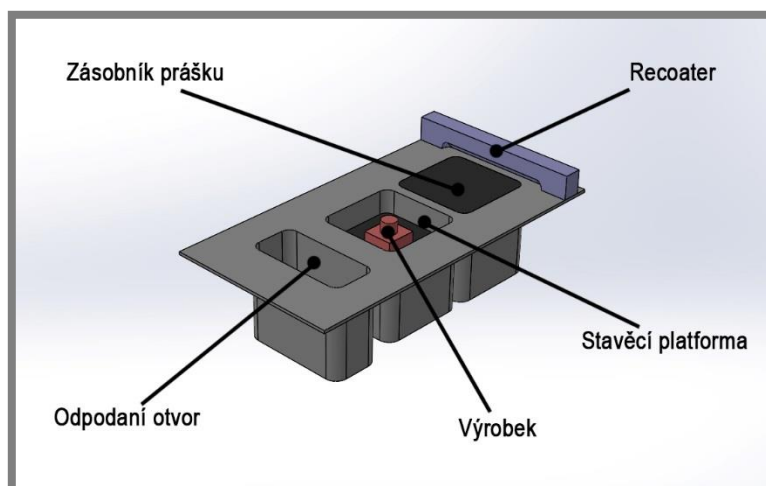


Obr. 17 Schématický popis konceptu zařízení

4.2 Způsob nanášení prášku

4.2.1 Varianta se dvěma zásobníky

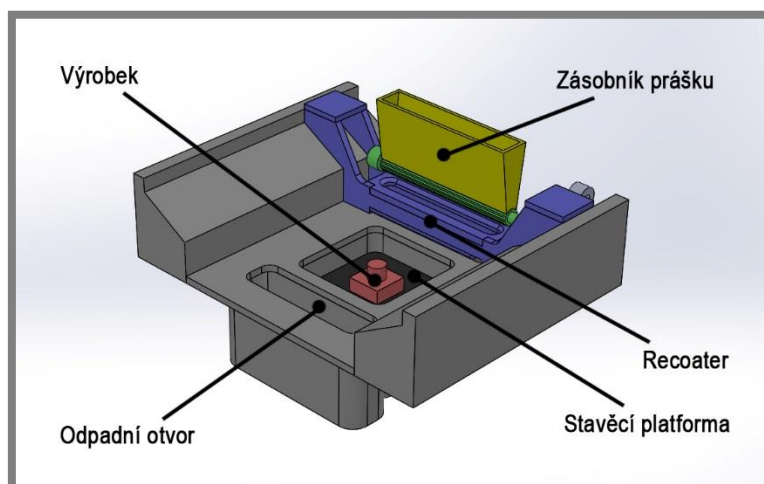
První způsob nanášení prášku je možné vidět na obr. 18. Tato varianta představuje dva zásobníky, které se zasouvají pod pracovní rovinu. Jeden zásobník slouží jako zásobník prášku a druhý jako stavěcí prostor. Proces nanášení probíhá tím způsobem, že se zásobník prášku posune směrem nahoru a vysune množství prášku nad úroveň pracovní roviny. Zároveň se stavěcí platforma zasune pod pracovní rovinu o velikost tloušťky vrstvy. Následně nanášecí mechanismus přesune prášek ze zásobníku prášku do prostoru stavěcí platformy a vytvoří homogenní vrstvu. Přebytek prášku je přesunut do odpadního otvoru.



Obr. 18 Schematické znázornění způsobu nanášení prášku mezi dvěma zásobníky

4.2.2 Varianta se zásobníkem prášku nad komorou

Druhá varianta je znázorněna na obr. 19. V tomto způsobu je zásobník prášku nad komorou recoateru. Před procesem nanášení vrstvy je potřebné množství prášku nasypáno do nebo před recoater.

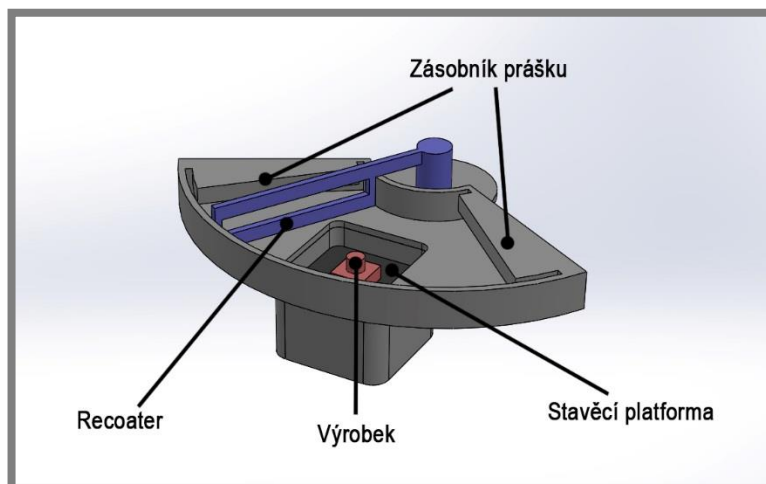


Obr. 19 Znázornění způsobu nanášení prášku se zásobníkem nad komorou.

4.2.3 Varianta radiálního nanášení prášku

4.2.3

Poslední používaný způsob nanášení prášku je zobrazen na obr. 20. V tomto případě je způsob nanášení prášku stejný jako v předchozích dvou variantách, avšak nanášecí mechanismus je uchycen rotačně a vykonává kyvný pohyb v ose.



Obr. 20 Schematické znázornění radiálního způsobu nanášení prášku

4.3 Tvar stavěcího prostoru

4.3

4.3.1 Obdélníkový průřez

4.3.1

V případě obdélníkového průřezu by mohly být stěny stavěcího prostoru tvořeny plechy. Výhodou obdélníkového průřezu je větší stavěcí objem, vzhledem k zástavbovému prostoru, shodný s kruhovým průřezem. Nevýhodou obdélníkového průřezu je nerovnoměrné rozložení teploty stavěcího objemu. V rozích by byla nižší teplota než ve středu objemu, což by mělo vliv na kroucení a přesnost výrobku. Další nevýhodou je špatné vzduchové utěsnění rohů. Tento problém by bylo možné vyřešit vytvořením obdélníkového průřezu se zaoblenými rohy, stejně jako u profesionálních strojů, které však mají stavěcí prostor vyfrézovaný z jednoho kusu materiálu.

4.3.2 Kruhový průřez

4.3.2

Stavěcí prostor kruhového průřezu by mohl být tvořen tlustostěnnou trubkou z hliníkové slitiny. Výhodou tohoto řešení je rovnoměrnější rozložení teploty v celém stavěcím prostoru a poměrně snadný způsob vzduchové izolace. Nevýhodou je omezení průměru stavěcího objemu na průměry polotovaru v závislosti na dostupnosti tlustostěnných trubek.

4.4 Typ laseru a pohyb laserového svazku

Způsob pohybu laserového svazku, umístění mechaniky a typ laseru spolu velmi úzce souvisí. Proto jsou tyto varianty řešeny společně. Pro pohyb svazku jsou uvažovány pouze kartézské mechanismy, jelikož cena a způsob řízení zrcátek na galvanometrech a F-Theta optiky je pro toto řešení nevyhovující.

4.4.1 CO₂ laser a pohybový mechanismus uvnitř komory

První varianta obsahuje pro aplikaci sintrování prášku, díky vlnové délce, nejvíce vhodný typ laseru, tedy CO₂. V této variantě se uvažuje použití CO₂ trubice a systémem optiky zahrnující tři zrcátka a jednu čočku spolu s optickou mechanikou a mechanikou pro pohyb v rovině XY. Jelikož je nutné, aby přístroj obsahoval temperovanou a vzduchotěsnou komoru, není možné vytvořit ve stropní stěně komory otevřený otvor. Z toho důvodu existují dvě varianty, jak tento problém vyřešit. Je možné do horní stěny komory nad stavěcí platformu umístit průhled tvořený optickým sklem, které bude mít alespoň stejnou velikost jako stavěcí platforma. Cena optického skla pro vlnovou délku CO₂ laseru větších rozměrů je však velmi vysoká. Nebo by bylo možné umístit optiku laseru spolu s mechanikou dovnitř komory a optický svazek do ní dostat přes malé sklíčko v boční stěně. Tato varianta ovšem skýtá použití mechaniky určené do dlouhodobě poměrně vysoké teploty.

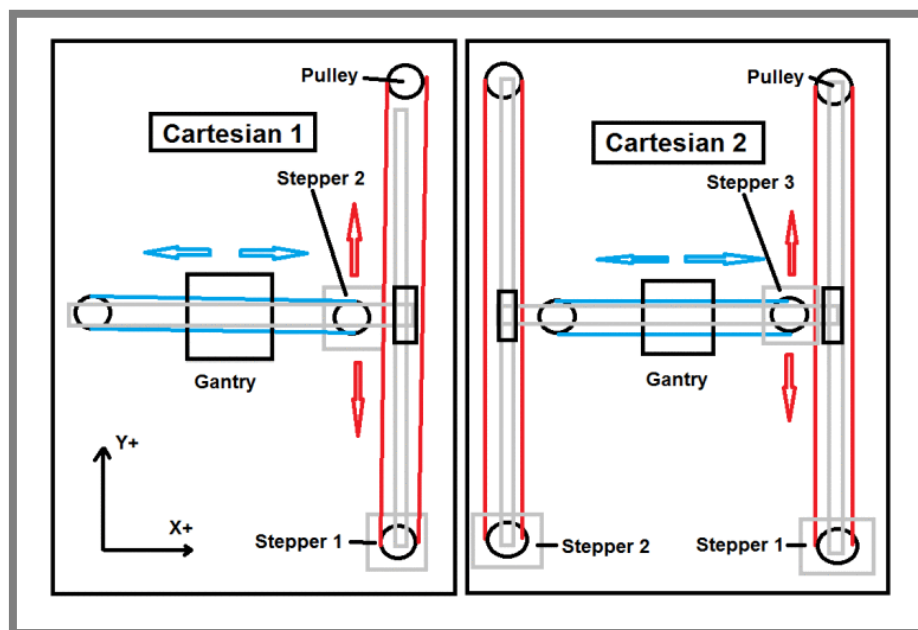
4.4.2 Diodový laser a pohybový mechanismus vně komory

Druhá varianta spočívá v diodovém laseru, který je možné díky jeho rozměrům a hmotnosti umístit přímo na mechanismus pohybu. Je však také možné použít systém kolmých zrcadel. Tělo diodového laseru obvykle obsahuje kolimátor, kterým je možné přímo fokusovat svazek do zvolené vzdálenosti. Jelikož má diodový laser vlnovou délku v oblasti viditelného spektra, je možné ho umístit vně komory nad stavěcí platformu a laserový svazek vést do komory přes běžné křemenné sklo.

4.5 Mechanismus pohybu laserového svazku

4.5.1 Klasický kartézský mechanismus

První možností, jak pohybovat zrcátka laseru nebo tělem diodového laseru, je klasický kartézský mechanismus. Schéma takového mechanismu lze nalézt na obr. 21. Varianta předpokládá vytvoření běžného mechanismu, který se dokáže pohybovat ve dvou směrech, využívaného například v laserových rezačkách nebo CNC obráběcích strojích.

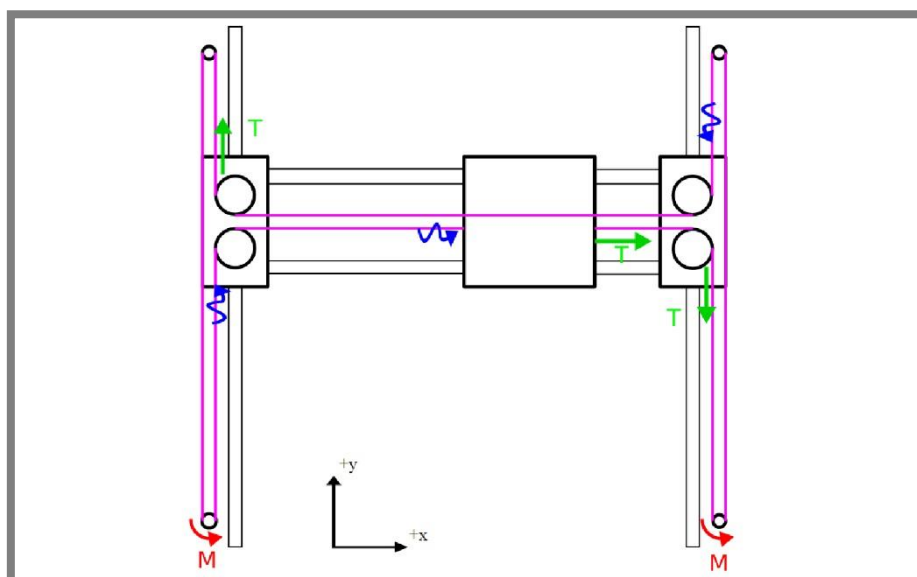


Obr. 21 Schematické zobrazení kartézského pohybového systému [22]

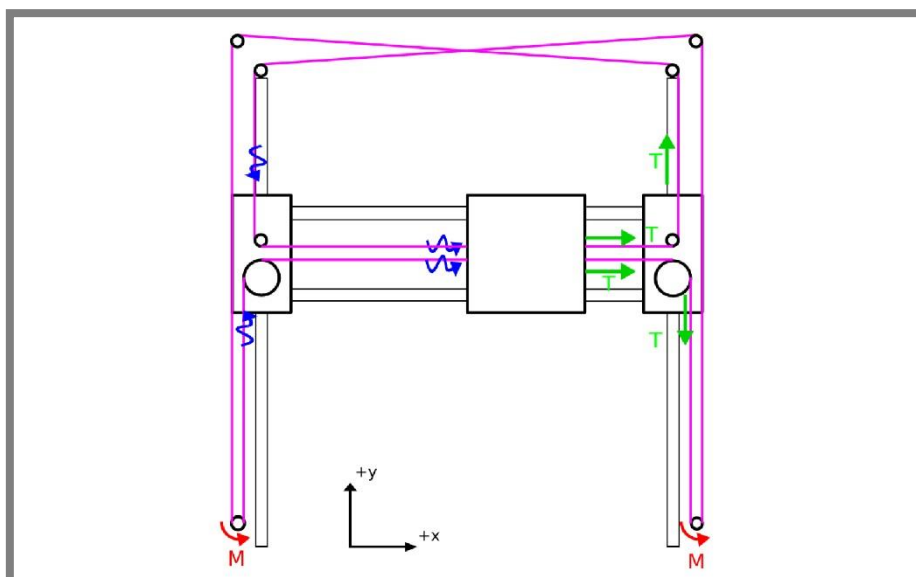
4.5.2 CoreXY a Hbot

4.5.2

Dalšími mechanismy pro pohyb v rovině XY jsou mechanismy typu Hbot, nebo Core XY. Hlavní výhodou těchto mechanismů je statické uložení obou motorů. Motory se tak nepohybují spolu s mechanismem a hmotnost, se kterou je nutné pohybovat je tak menší, tudíž jsou nižší i setrvačné síly. Nevýhoda obou mechanismů, oproti klasickému mechanismu, je ve větší délce řemenů. V případě protažení řemene tak vzniká větší chyba polohování. V Hbot mechanismu je použit kratší řemen, avšak síly v mechanismu nepůsobí stejným směrem, čímž vzniká vyšší požadavek na tuhost mechanismu. Oba mechanismy i znázornění působících sil je možné vidět na obr. 22 a obr. 23.



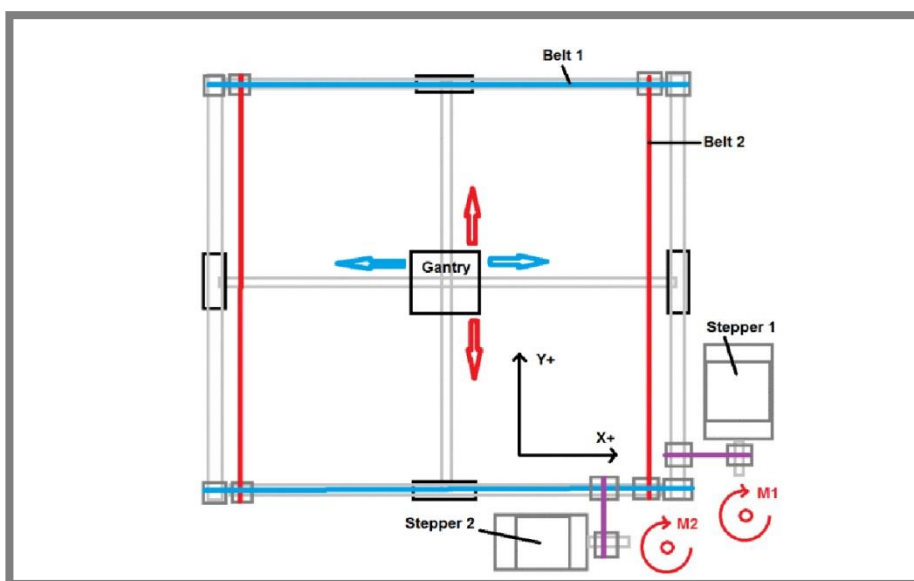
Obr. 22 Schematické zobrazení mechanismu Hbot [22]



Obr. 23 Schematické zobrazení mechanismu Core XY [22]

4.5.3 Mechanismus Ultimaker

Další možnou variantou je pohybový mechanismus, který využívá FDM tiskárna Ultimaker. Mechanismus se vyznačuje využitím lineárních ložisek a broušených tyčí jak k lineárnímu pohybu, tak rotaci tyčí a přenášení krouticího momentu pro pohon druhé osy. Schéma mechaniky je zobrazeno na obr. 24.



Obr. 24 Schematické zobrazení mechanismu v tiskárně Ultimaker [22]

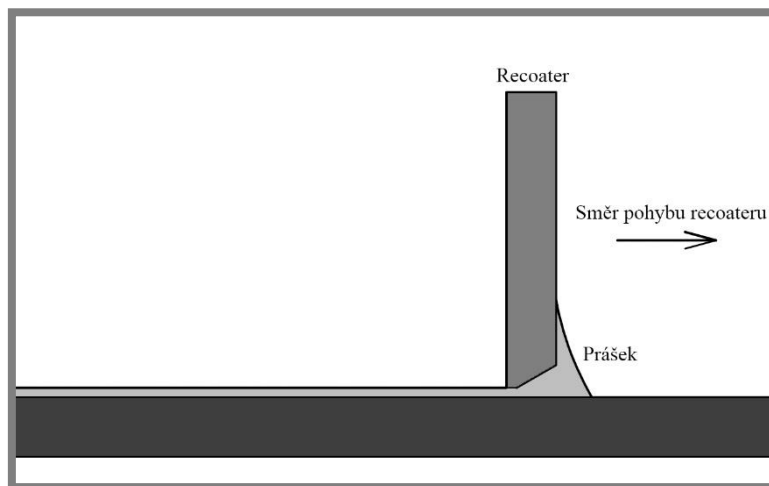
4.6 Typ recoateru

4.6

4.6.1 Břitový recoater

4.6.1

Prvním způsobem nanášení vrstvy prášku je břit, který před sebou hrne množství prášku a přesouvá jej do stavěcího prostoru. U tohoto systému závisí kvalita nanesené vrstvy na úhlu hrany recoateru. Nákres břitového recoateru je znázorněn na obr. 25.

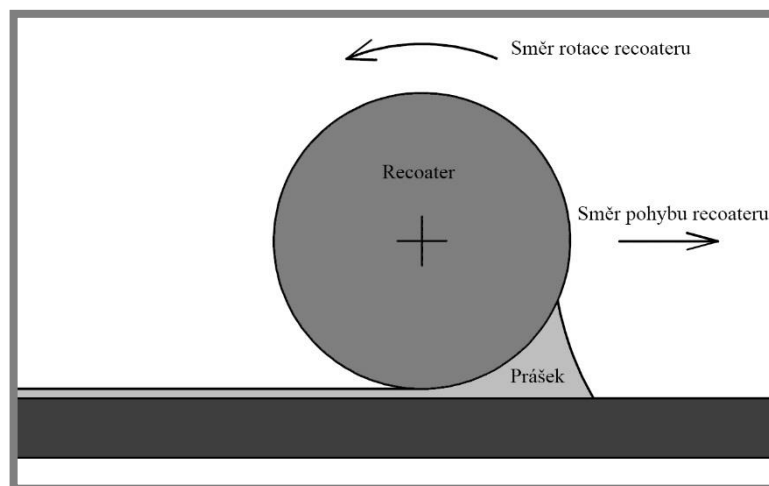


Obr. 25 Schéma břitového recoateru

4.6.2 Rotační recoater

4.6.2

Druhá varianta pracuje s recoaterem ve formě válce, který se otáčí proti směru pohybu. Tuto variantu je možné vidět na obr. 26. Tento typ recoateru je více vhodný pro experimentování s materiály, jelikož umožňuje nanášet vrstvu prášku i přes předchozí zkroucené vrstvy, které vystupují nad pracovní rovinu. Také je možné případně snadno nahradit rotační recoater břitovým.



Obr. 26 Schéma válečkového recoateru

4.7 Experimenty

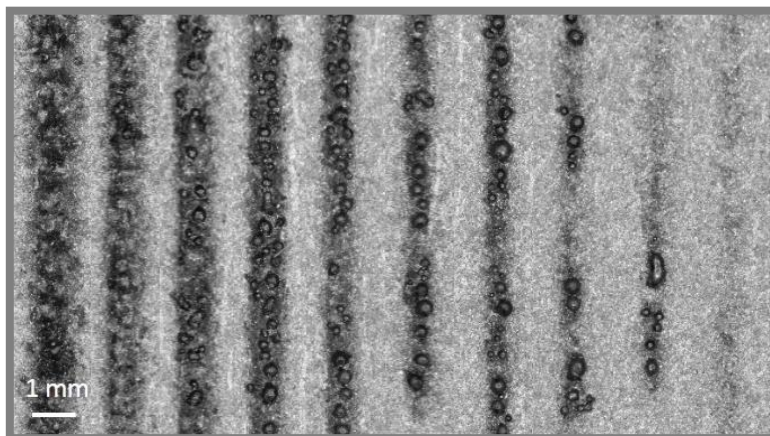
Cílem experimentů bylo zjistit, které typy materiálů je možné sintrovat CO₂ a diodovým laserem.

4.7.1 Experimenty s CO₂ laserem

Pro experimenty s CO₂ laserem byla využita laserová gravírka, běžně využívaná např. v reklamním průmyslu. Přístroj umožňuje pohyb laserového svazku a stolu. Maximální výkon laserové trubice je 80 W.

CO₂ laser a nerezová ocel SS316L

Kromě polyamidových prášků byla testována i kovová slitina, kterou je možné zpracovat i při poměrně malých výkonech laseru. Byl realizován experiment, který měl za cíl ověřit schopnost CO₂ laseru spékat prášek z nerezové oceli s označením SS316L (podle starého označení ČSN 17240 a nového ČSN 1.4301). Tento materiál je velmi vhodný pro první experimenty, jelikož se jedná o jeden z nejlépe procesně zvládnutelných kovových materiálů technologií SLM. Pro tento experiment byla připravena platforma z nerezové oceli stejného materiálu jako prášek, na kterou byla nanесena vrstva prášku. Platforma s práškem byla následně vložena do CO₂ laserové gravírky, ve které proběhlo několik tzv. single tracků. Při experimentu byl výkon laseru nastaven na 80 W a rychlost pohybu svazku (1 až 10) mm.s⁻¹. Výsledek experimentu je možné vidět na obr. 27.



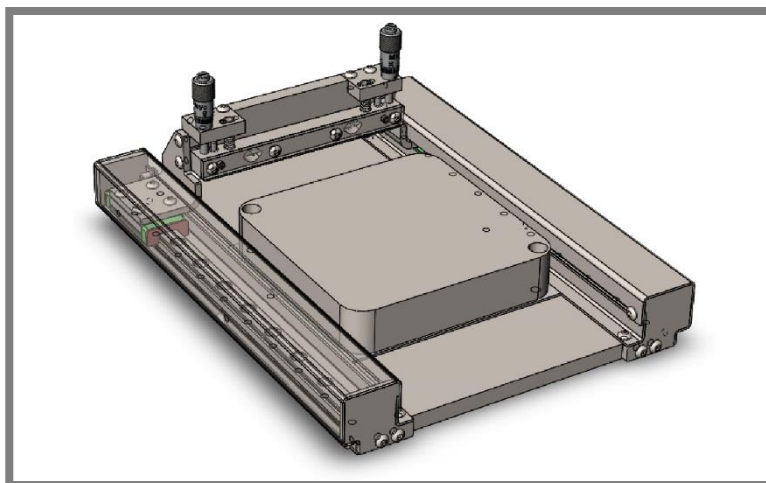
Obr. 27 Výsledek experimentu s CO₂ laserem a práškem SS316L

Z obrázku je patrné, že i při nejnižší použité rychlosti pohybu 1 mm.s⁻¹ (první návar), tedy nejvyšší hustotě energie, nedošlo k plynulému vytvoření návaru. Při vyšších rychlostech pak docházelo k balling efektu. Tento fakt je způsoben především nevhodnou vlnovou délkou laseru, pro tento typ procesu, poměrně nízkým výkonem a vysokým obsahem kyslíku v atmosféře, jelikož experiment neprobíhal pod inertní atmosférou. I v případě vytvoření návaru při tak malých rychlostech by výsledné zařízení pro tisk z kovu nebylo příliš produktivní.

Nanášecí zařízení

Pro účely experimentů s jednou vrstvou prášku vznikl požadavek na navržení nanášecího zařízení, pomocí něhož bude uživatel schopen nanést rovnoměrnou vrstvu prášku definované tloušťky na stavěcí platformu. Doposud bylo nutné nanést vrstvu prášku pomocí přípravku, který nedokázal zajistit rovnoměrnou vrstvu, a především nebylo jisté, jakou tloušťku vrstvy prášku uživatel nanesl.

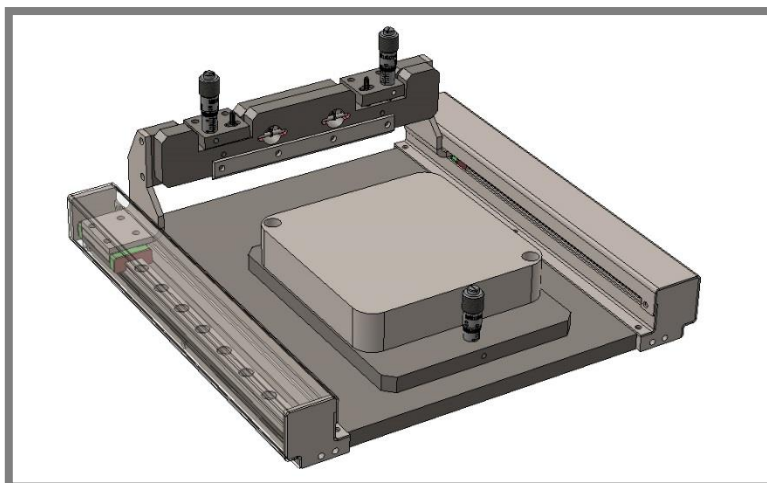
Navržené nanášecí zařízení je možné vidět na obr. 28. Nanášecí zařízení je postaveno na základní desce s broušenými plochami, na kterých je připevněn pár lineárního vedení a platforma z SLM 3D tiskárny. K lineárnímu vedení je přichycen recoater, jehož břit je možné pomocí dvou mikrometrických šroubů zvedat pro definování výšky vrstvy prášku, či naklápět a v případě potřeby nanést vrstvu prášku s proměnnou výškou pro speciální typ testu singletracků.



Obr. 28 Varianta nanášecího zařízení s broušenými plochami

Po navržení zařízení se ukázalo, že tuto sestavu z nerezové oceli není možné vyrobit v ústavní dílně a výroba kooperací by byla poměrně nákladná. Na základě tohoto zjištění bylo zařízení modifikováno tak, aby jeho výroba byla co možná nejlevnější a zvládnutelná v podmínkách výrobní dílny.

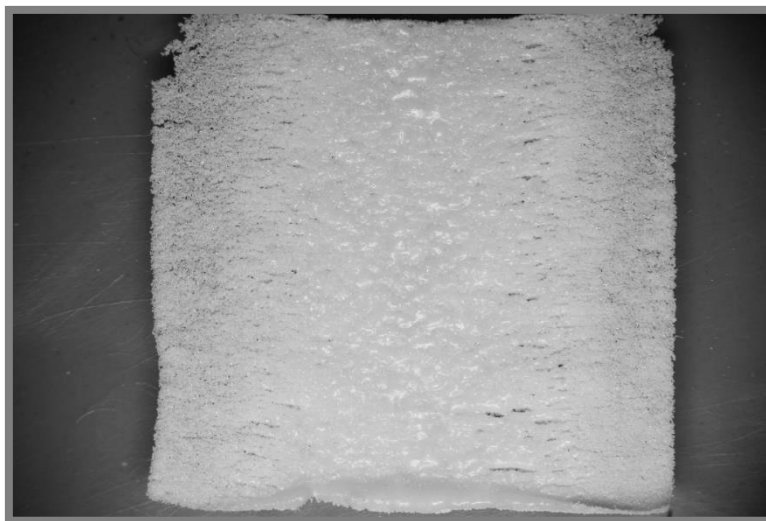
V nové verzi nanášecího zařízení se ustoupilo od nerezové oceli a broušených ploch a přešlo se k běžné konstrukční oceli povrchově upravené černěním. Variantu upraveného nanášecího zařízení je možné vidět na obr. 29. Kontaktní plochy se realizovaly pomocí prefabrikovaných, broušených, nerezových valivých elementů. Stejného řešení se často využívá v optické mechanice, jelikož je tímto způsobem a za použití mikrometrických šroubů možno eliminovat vzniklé výrobní nepřesnosti. V této verzi mechanismu je možné platformu v jedné ose naklápět a v druhé natáčet recoaterem. Deska pro uchycení platformy je umístěna na dvou kuličkách a mikrometrickém šroubu, přičemž k základně je přitahována pružinami. Kluzné plochy mechanismu recoateru jsou tvořeny broušenými válečky a kuličkami. Tyto elementy jsou uspořádány tak, aby umožňovaly volný pohyb pouze v požadovaných směrech. Základna nanášecího zařízení je zespoda osazena třemi kuličkami pro zajištění stabilní polohy zařízení.



Obr. 29 Varianta nanášecího zařízení s broušenými elementy

CO₂ laser a PA12

Při experimentu byl použit recyklovaný prášek PA12, který byl umístěn do nízké hliníkové nádoby na pracovní plochu CO₂ laseru. Pro experiment byly připraveny trasy laseru, díky nimž optický svazek pohybem vyplnil čtvercovou plochu strany 20 mm. Trasy byly tvořeny úsečkami s rozestupy 0,2; 0,25 a 0,3 mm. Rychlost pohybu laserové hlavy byla nastavena na 100 mm.s⁻¹ a výkon laseru byl pro každý vzorek měněn po jednom od 7 do 20 W. Typický výsledek experimentů je možné vidět na obr. 30.

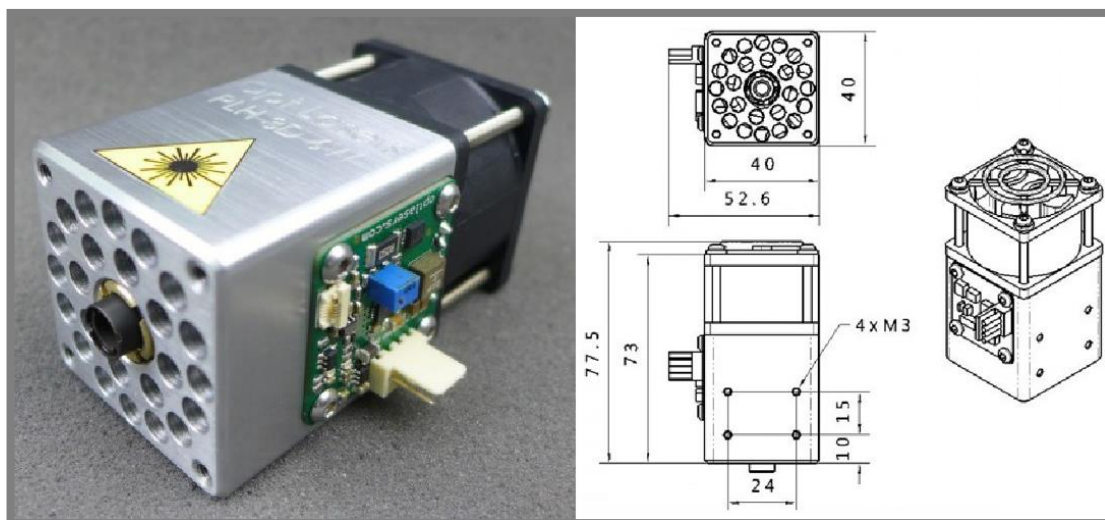


Obr. 30 Výsledek experimentu s CO₂ laserem a materiálem PA12

4.7.2 Experimenty s diodovým laserem

Pro tento experiment a případné použití v přístroji byl pořízen diodový laser výkonu 6 W, který je zobrazen na obr. 31. Laser má vlnovou délku 445 nm, která v oblasti viditelného spektra pro lidské oko představuje modrou barvu. Laser má ze své podstaty obdélníkový průřez svazku. Na těle laseru je umístěna optika, která umožňuje zaostřování svazku do vzdálenosti (50 až 150) mm. Laser je také vybaven ventilátorem, který vytváří proud vzduchu procházející otvory v těle laseru. Proud vzduchu chladí diodu laseru a zabraňuje přilnutí nečistot na optice v případě vzniku kouře např. při řezání, či gravírování materiálu. Napájecí napětí laseru je 12 V a jeho výkon je možné v celém rozsahu regulovat pomocí analogového vstupu (0 až 5 V), či PWM signálem. Při zacházení s laserem je nutné nosit ochranné brýle. V opačném případě hrozí poškození zraku i odraženým paprskem poměrně výkonného laserového svazku.

Pro účely experimentu byl laser připevněn na FDM 3D tiskárnu namísto extrudovací trysky. Sintrovaný prášek byl umístěn v nízké hliníkové nádobce položené na stavěcí podložce. Nad sintrovaným práškem bylo umístěno běžné tabulové sklo tloušťky 3 mm pro simulaci reálných podmínek v budoucím zařízení a z důvodu proudu vzduchu vycházejícího z laserové hlavy, který by v případě nepřítomnosti skla prášek rozfoukal.



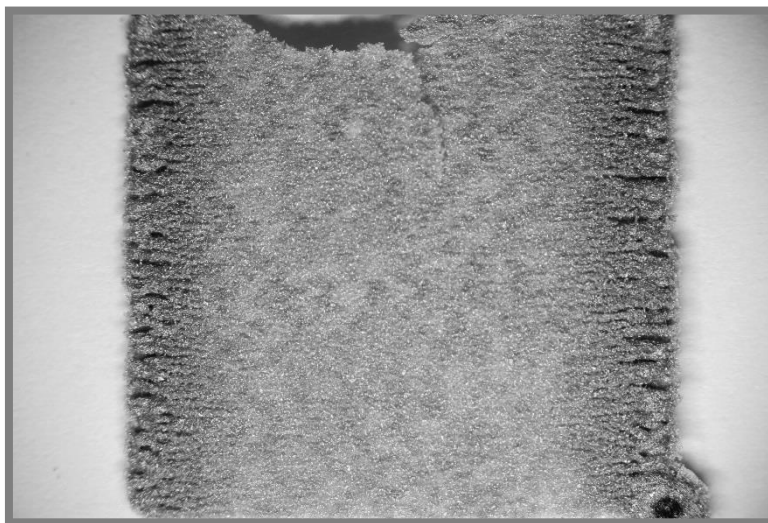
Obr. 31 Diodový laser o výkonu 6 W [23]

Diodový laser a PA12

Během tohoto experimentu byl testován nejčastěji používaný plastový prášek, polyamid PA12 s triviálním názvem nylon. Prášek byl umístěn do nízké nádobky na vyhřívanou podložku, která byla nahřátá na 130 °C. Po zahřátí prášku byl aplikován plný výkon laseru do jedné oblasti velikosti plochy průřezu fokusovaného svazku. I po uplynutí 60 s aplikování plného výkonu laseru nedošlo k sintrování prášku. V experimentu nebylo možné diodovým laserem spékat čistý prášek PA12 z důvodu nízké absorptivity tohoto materiálu pro laser o dané vlnové délce.

Alumid

V případě tohoto experimentu bylo postupováno stejně jako u experimentu s práškem PA12. Po několika desetínách sekundy aplikování plného výkonu laseru do jedné oblasti nastalo roztavení a spečení prášku. Po tomto zjištění následoval experiment, který měl za cíl vytvořit jednolitou vrstvu sintrovaného prášku. Toho bylo dosaženo pohybem hlavy po trase, která vyplnila oblast čtvercového tvaru o velikosti strany 20 mm. Proběhlo několik experimentů, přičemž výkon laseru byl nastaven na maximum, tedy 6 W a byla pouze měněna rychlost pohybu. Výsledek experimentu pro maximální testovanou rychlost pohybu 100 mm.s^{-1} je možné vidět na obr. 32.



Obr. 32 Výsledek experimentu s diodovým laserem a Alumidem

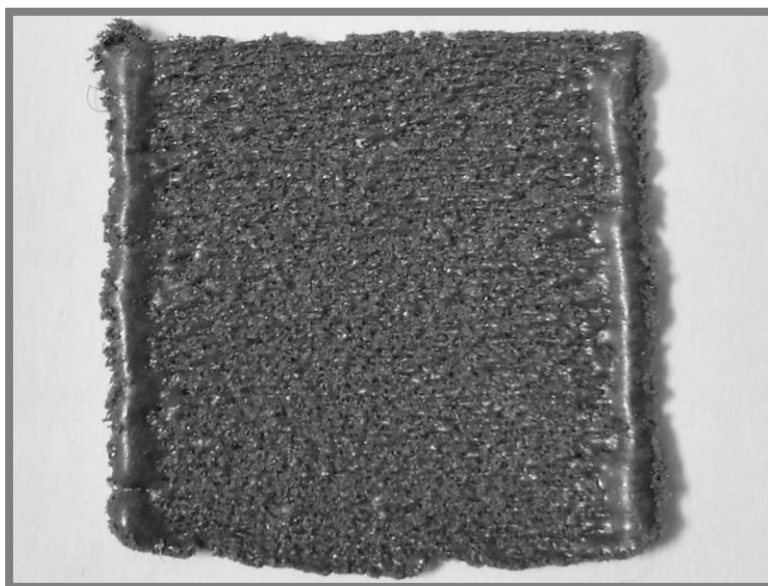
Na obrázku lze vidět střední oblast, ve které je prášek spečen. Dále je možné pozorovat okraje vzorku, které mají od střední části odlišnou strukturu. Tato skutečnost je způsobena neregulováním výkonu laseru v závislosti na rychlosti pohybu. V krajních částech docházelo ke zpomalení do nulové rychlosti a následnému zrychlení do maximální rychlosti. To způsobilo zvýšení hustoty aplikovaného výkonu. Oblast v pravém dolním rohu vzorku vznikla v důsledku zastavení pohybu laserové hlavy a pokračující aplikaci výkonu, jelikož výkon laseru byl regulován obsluhou.

Směs PA12 a hliníkové slitiny

Pro další experiment byla namíchána směs recyklovaného polyamidu PA12 a hliníkové slitiny. Poměr komponent byl spočítán na základě známé hustoty Alumidu a jeho komponent Tato směs prášku byla testována stejně jako předchozí prášky. Fotografie z vážení prášku jsou na obr. 33 a výsledek experimentu na obr. 34.



Obr. 33 Vážení prášku pro směs hliníku a PA12



Obr. 34 Výsledek experimentu s diodovým laserem a směsí hliníku s PA12

4.7.4 Zhodnocení a výběr optimální varianty řešení

Způsob nanášení prášku

V profesionálních tiskárnách se často vyskytují zásobníky prášku a odpadní otvory na obou stranách komory, čímž je dosaženo rychlejšího procesu výroby, jelikož se recoater nemusí při každém nanesení prášku vracet do původní polohy. Vzhledem k tomu, že navrhované zařízení má být prototyp pro experimentální účely, nebude tohoto způsobu pro zrychlení stavby využito kvůli zlevnění a zjednodušení výroby.

Varianta radiálního nanášení byla vyhodnocena jako nespolehlivá, jelikož rychlost pohybu recoateru se mění úměrně s poloměrem a nebylo by tak možné plně definovat rychlost pohybu v případě nerovnoměrného nanášení prášku.

Nevýhodou varianty řešení se dvěma zásobníky je nutnost předem odhadnout potřebný objem pro zásobník prášku. Pro zajištění rovnoměrného rozmístění prášku po celé pracovní ploše recoater musí přenášet větší objem prášku, než je objem jedné vrstvy. Na základě tohoto odhadu je potom třeba navrhnout větší objem zásobníku. Výhodou řešení je stejná konstrukce zásobníku prášku i stavěcího prostoru. Výhodou varianty se zásobníkem prášku nad komorou je menší zástavbový prostor komory vůči předchozí variantě.

Tvar stavěcího prostoru

Stavěcí prostor je vhodnější zvolit kruhového průřezu vzhledem k rovnoměrnějšímu rozložení teploty a lepší možnosti vzduchového utěsnění komory. Tato varianta však předpokládá vhodný polotovar ve tvaru trubky o dostatečném průměru.

Typ laseru a pohyb laserového svazku

Největší vliv na proces SLS má laser, jeho typ definující vlnovou délku a výkon. Pro toto zařízení bude použit diodový laser a to z toho důvodu, že v případě použití CO₂ laseru, by mechanika pro pohyb laseru musela být umístěna uvnitř vyhřívané komory, nebo by musel svazek procházet přes velké optické sklo, které je nákladné. Výkon diodového laseru 6 W je dostatečný pro sintrování kompozitního prášku PA12 s hliníkem, a proto bude pro zařízení použit. Nevýhodou použití diodového laseru je skutečnost, že nebude možné sintrovat samostatný prášek PA12, ale pouze prášek s příměsí. Velkou výhodou je možnost umístění laseru s mechanikou pohybu mimo komoru a laserový svazek do komory propouštět běžným tabulovým sklem. Další výhodou jsou rozměry laserové hlavy, která je oproti CO₂ trubici značně kompaktnější.

Mechanismus pohybu laserového svazku

Z kartézských mechanismů je vybrána varianta klasického kartézského mechanismu, jelikož je ze všech zmíněných mechanismů nejpresnější, kvůli nejkratším řemenům i přes vyšší hmotnost, kterou je nutné kvůli zavěšenému motoru na jedné ose pohybovat.

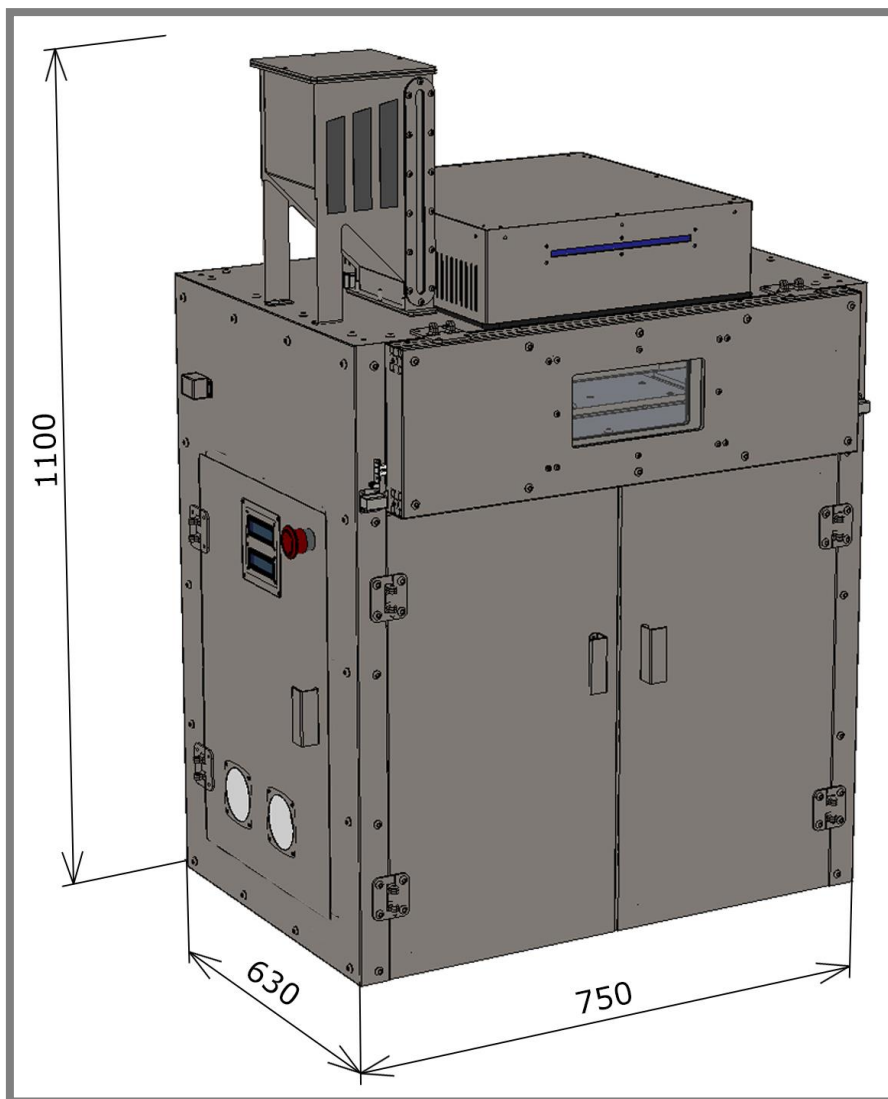
Typ recoateru

Typ recoateru je zvolen rotační. Tento typ by měl umožnit výrobu i přes mírně zkroucené vrstvy dílu, což břitový recoater neumožňuje, jelikož se o takovéto vrstvy zachytí a tisk znehodnotí.

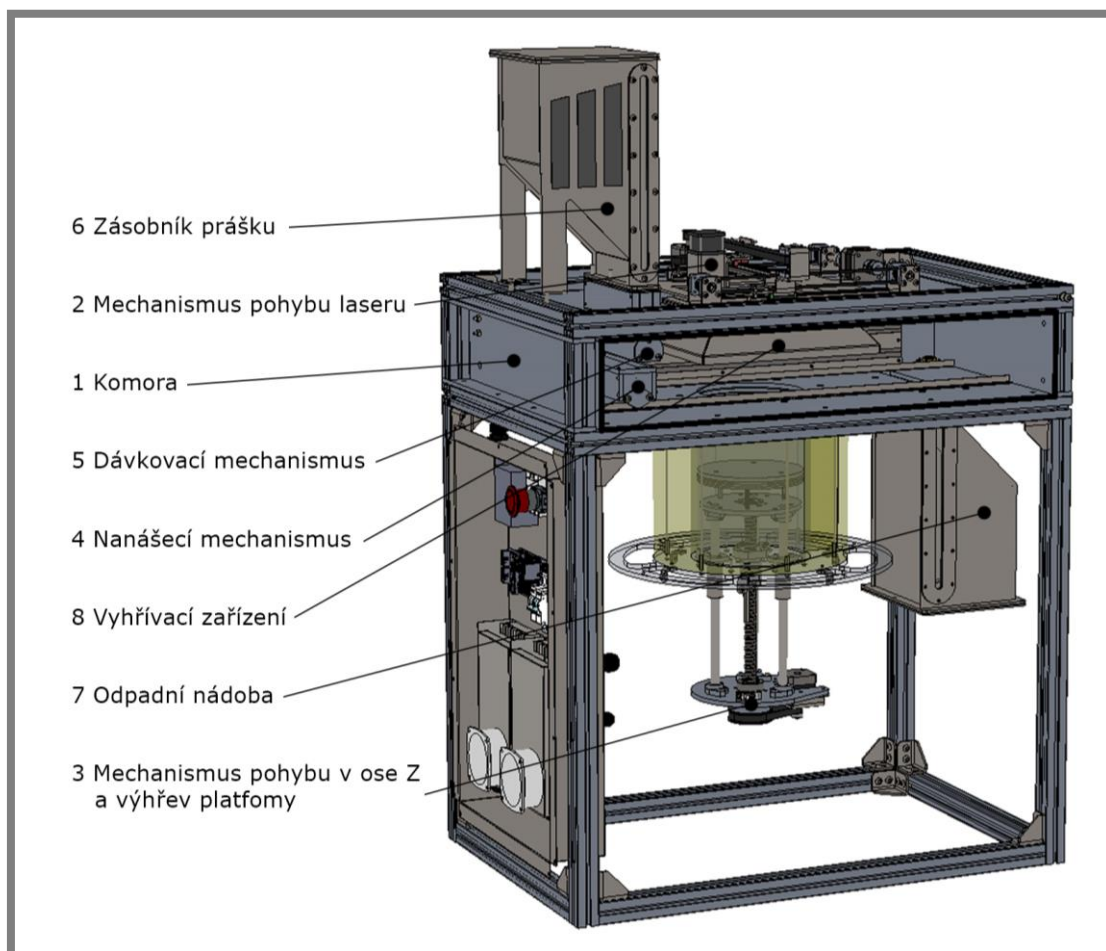
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukce SLS 3D tiskárny je složena z rámu a stěn komory (1), mechanismu pro pohyb laseru (2), mechanismu pro pohyb a výhřev stavěcí platformy (3), nanášecího mechanismu (4) a dávkovacího mechanismu (5) a krytování přístroje. Dále pak obsahuje zásobník prášku (6), odpadní nádobu (7) a zařízení pro vyhřívání povrchu nanesené vrstvy (8). Model celého přístroje je možné vidět na obr. 35. Odhalená konstrukce s popisem jednotlivých částí je pak na obr. 37. Konstrukce byla navržena s ohledem na cenu komponent, komplikovanost a cenu výroby a rozměry přístroje. Většina dílů je vyrobena z nerezových a hliníkových plechů vyřezaných laserem a ohýbaných na ohranovacím stroji. Řada pohledových dílů je povrchově upraveno pískováním. Součásti byly navrhovány tak, aby bylo nutné obrábět pouze minimální množství dílů a většinu operací bylo možné zvládnout ve studentské dílně ústavu konstruování.

Veškeré komponenty uvnitř vyhřívané komory byly vybírány s ohledem na zvýšenou teplotu, která byla předpokládána na 130 °C. V komoře byla použita ložiska pro běžné teploty, ze kterých bylo odstraněno jejich plastové krytování a mazivo bylo nahrazeno potravinářským mazivem určeným pro teploty do 200 °C.



Obr. 35 Model SLS 3D tiskárny



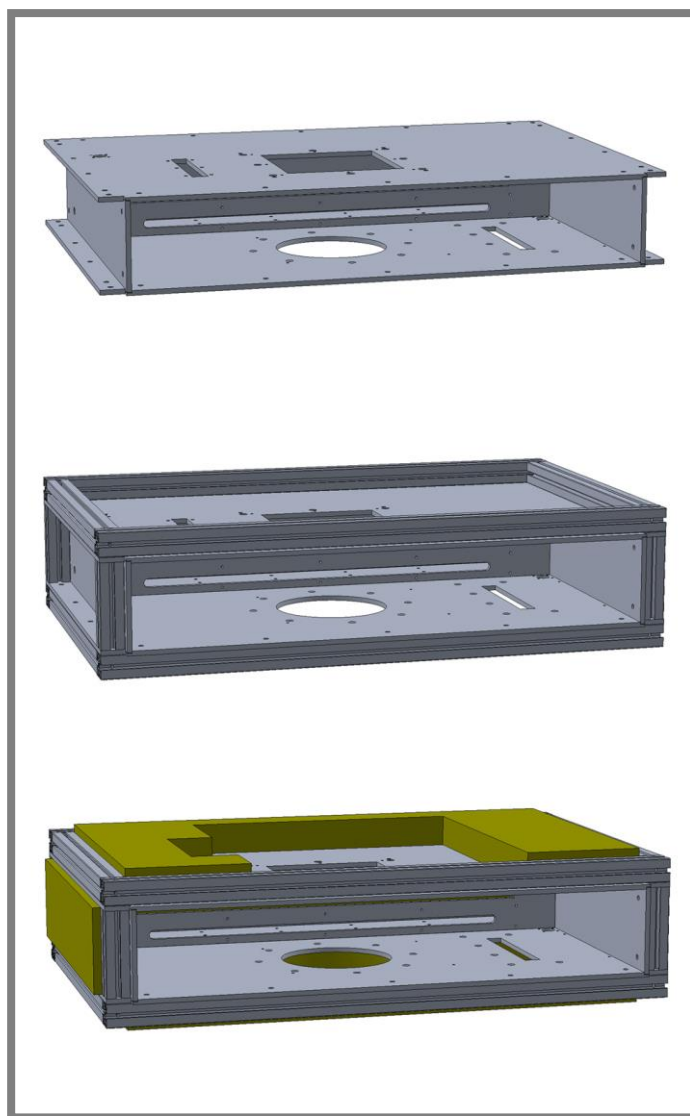
Obr. 37 Odhalený model SLS 3D tiskárny



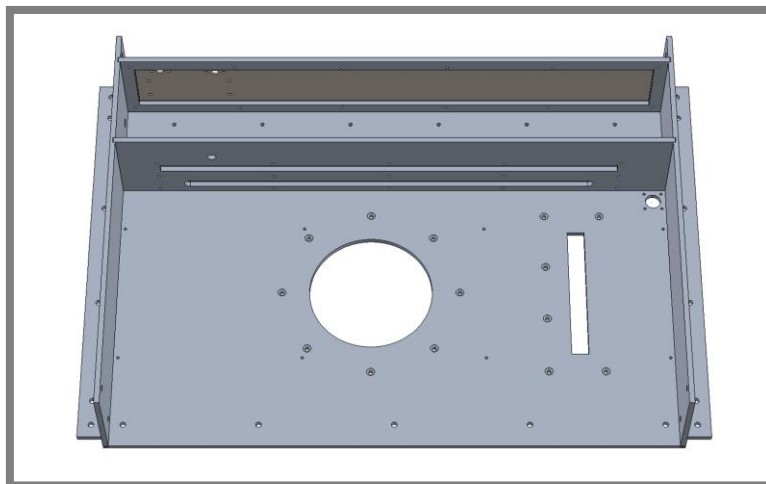
Obr. 36 SLS 3D tiskárna

5.1 Komora

Komora přístroje je navržena jako vzduchotěsná a tepelně izolovaná. Je složena z šesti hliníkových desek tloušťky 6 mm a krytu zadní stěny z nerezové oceli tloušťky 2 mm. V horní, spodní a obou bočních stěnách jsou vyfrézované drážky, do kterých jsou kolmé stěny vsazeny. V těchto drážkách jsou umístěny silikonové pláty, které zajišťují vzduchotěsnost spoje. Stěny komory jsou vyztuženy a spojeny hliníkovými profily velikosti (30 x 30) mm. Komora je umístěna na profilech stejného typu, které tvoří zbytek rámu. Zadní stěnu tvoří hliníková deska s otvorem a kryt. Tímto vzniká možnost manipulovat s částmi mechaniky nanášecího zařízení, které jsou umístěny v této části komory i při kompletním sestavení. Model komory je zobrazen na obr. 38 a obr. 39 a fotografie rozložené komory na obr. 40.



Obr. 38 Model stěn komory s rámem a tepelnou izolací



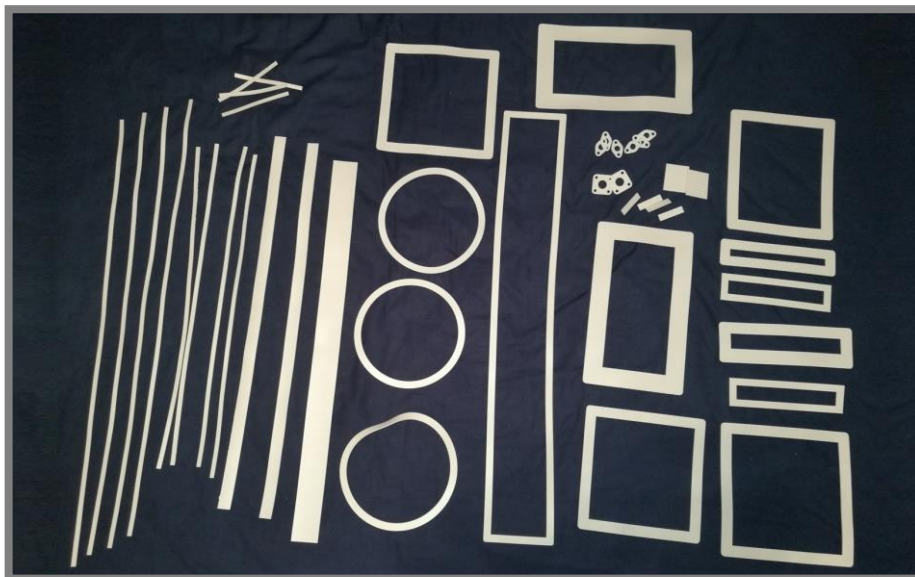
Obr. 39 Horní pohled na model komory



Obr. 40 Rozložená komora

5.1.1 Vzduchotěsnost

Vzduchotěsnost přístroje je zajištěna pláty ze silikonu (obr. 41), vloženými ve spojích součástí. Pláty byly vyrobeny CNC řezacím plotrem a jsou určeny pro teploty do 200 °C. Tloušťky plátů jsou 1 a 1,5 mm. Jelikož krokové motory a koncové spínače nemohou být umístěny ve vyhřívané komoře, bylo nutné tyto komponenty umístit mimo komoru. Vzduchotěsnost otvorů ve stěnách komory pro vystupující hřídele nanášecího a dávkovacího zařízení a tyč koncového spínače nanášecího zařízení je zajištěna silikonovými o-kroužky, umístěnými v utěsněném domečku, který je zobrazen na obr. 42.



Obr. 41 Nařezané silikonové pláty



Obr. 42 Utěsněná průchodka hřídele

5.1.2 Tepelná izolace

Pro tepelnou izolaci komory byla zvolena kamenná vata tloušťky 40 mm, která je určena pro stavební tepelné, protipožární a akustické izolace. Izolace je určena pro teploty až 1000 °C a její součinitel tepelné vodivosti je 0,039. Izolace je umístěna na vnější straně všech stěn komory a zajištěna okolním krytváním. Tepelná izolace je také ve dvířkách komory.

5.1.3 Přívod inertní atmosféry

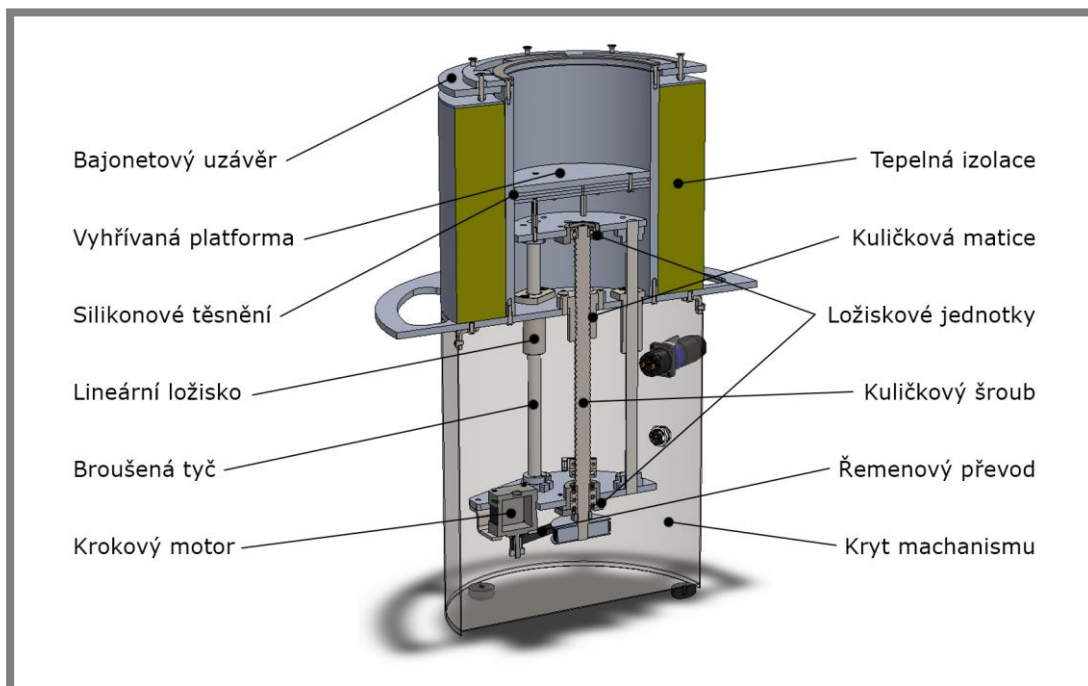
Do komory tiskárny je možné přivést inertní atmosféru pomocí přichystaných vzduchových hadic a vývodů v komoře ve formě tlumičů. Vývod je zobrazen na obr. 43. Tlumiče jsou pro vývody použity z důvodu omezení víření vzduchu v komoře. Jeden vývod je umístěn v horní stěně komory a druhý ve spodní stěně. V případě využití nejčastěji používaného inertního plynu, dusíku, který je lehčí než vzduch, je přívod v horní stěně a vývod ve spodní. Tímto způsobem dusík původní vzduch vytlačí a v komoře ho nahradí. Pro účely experimentů se předpokládá využití dusíkového vyvíječe umístěného v SLM 3D tiskárně spolu se senzorem množství kyslíku v atmosféře. Při přívodu inertního plynu z vyvíječe do komory se vytvoří mírný podtlak, asi 15 mbarů, který zabrání vniku okolního vzduchu do komory.



Obr. 43 Přívod inertní atmosféry

5.2 Mechanismus pohybu v ose Z a vyhřev platformy

Tento mechanismus pohybuje platformou v ose Z. Při pohybu směrem dolů vytváří výšku vrstvy a postupně tvoří stavěcí objem. Celou sestavu je možné z přístroje po ukončení tisku vytáhnout pro snadnější vyjmutí vyrobeného dílu a okolního prášku. Průměr stavěcího prostoru je 140 mm a maximální výška také 140 mm. Model mechanismu je zobrazen na obr. 44, fotografie kompletní osy Z na obr. 45.



Obr. 44 Model sestavy mechanismu pohybu v ose Z a vyhřívání platformy

Nosnou součástí stavěcího prostoru je tlustostěnná trubka. Vnitřní průměr trubky definuje velikost stavěcího prostoru. Trubku se stěnou tloušťky alespoň 10 mm bylo možné v běžném sortimentu hutního materiálu najít s maximálním vnitřním průměrem 140 mm. K trubce je v dolní části připevněna hliníková deska, na které jsou umístěny součásti mechanismu. Vnější část desky slouží k uchopení mechanismu při vytahování z přístroje. K horní ploše válce je uchycen díl, který je součástí bajonetového spoje, sloužícího k snadnému připojení sestavy ke komoře tiskárny. Trubka je obalena tepelnou izolací z kamenné vlny, používanou k izolaci potrubí například v teplárnách.

Pohyb platformy zajišťuje kuličková matice se šroubem průměru 16 mm a stoupáním 5 mm. Šroub je rotačně uložený ve standardních ložiskových jednotkách typu FK 12 a FF12 a jeho rotací vzniká pohyb platformy. Tři lineární vedení tvořené dvojítymi lineárními ložisky velikosti 12 mm, pohybujícími se na broušených tyčích, zabráňují rotačnímu pohybu platformy. Rotaci šroubu zajišťuje krokový motor připojený řemenovým převodem.

Stavěcí platforma je složena ze sady sešroubovaných plechů umístěných nad sebou a je vyhřívána šesti topnými patronami o výkonu 40 W. Mezery mezi plechy a patronami jsou vyplněny teplovodivou pastou. Do platformy je také přiveden termistor. K omezení přestupu tepla do zbytku mechanismu je platforma uchycena na třech distančních sloupcích. K zabránění úniku vzduchu a propadnutí prášku mezerou

mezi platformou a trúbkou slouží silikonový o-kroužek, který platformu po obvodu obepíná.

K sestavě je dále přichycen kryt mechanismu, který slouží také jako podstava. Ve stěně krytu jsou umístěny dva konektory. První je výkonnostní a slouží k přívodu napětí pro vyhřívání topných patron. Druhý konektor je pro připojení krokového motoru, termistoru a optického koncového spínače.

Odnímatelný stavěcí prostor z přístroje byl vytvořen z toho důvodu, že optika umístěná na diodové laseru má pouze omezenou fokusační vzdálenost, čímž je omezena výška komory a nebylo by tak možné vyjmout díl, který by byl vyšší než výška komory.



Obr. 45 Kompletní osa Z

5.2.1 Výpočet převodového poměru a síly potřebné k pohybu platformy

Běžné výšky vrstvy, které se v procesu SLS používají, a které musí být mechanismus schopný vytvořit, jsou 0,06 mm; 0,1 mm a 0,12 mm. Pro pohyb kuličkového šroubu je použit klasický krokový motor od firmy Mircocon s označením SX17 – 1005, který má statický moment 0,5 Nm. Motor má 200 kroků na jednu otáčku. Driver krokového motoru kroky dále rozdělí až na 32 mikrokroků. Pro přesné krokování je však vhodné použít celé, či maximálně poloviční kroky. V případě použití nejdostupnějšího kuličkového šroubu s označením 1605, tedy s průměrem 16 mm a stoupáním 5 mm, je možné polohovat osu Z při rozdílu jednoho kroku o 0,025 mm. To je 2,4 kroků pro výšku vrstvy 0,06 mm; 4 kroky pro výšku 0,1 mm a 4,8 kroků pro 0,12 mm. Jelikož počet kroků není celé číslo, ani číslo dělitelné 0,5 bez zbytku, je vhodné pohon převodovat. Vzhledem k dostupnosti řemenic pouze s určitým počtem zubů byl zvolen typ o počtu 60 a 12 zubů, které vytvoří převod v poměru 5:1. Při tomto převodu je pro výšku 0,06 mm potřeba 12 celých kroků, pro výšku 0,1 mm 20 kroků a pro výšku vrstvy 0,12 mm 24 kroků. S tímto převodem je tak možné teoreticky měnit výšku vrstvy o 5 µm při rozdílu jednoho kroku.

Kuličkový šroub musí zvednout mechanismus spolu s platformou a objemem prášku. Hmotnost zmíněného celku v případě Alumidového prášku je 5,8 kg. Maximální síla, kterou kuličkový šroub za pomoci krokového motoru vyvine je spočtena následující rovnicí:

$$F = \frac{2\pi \cdot M_z}{P} = \frac{2\pi \cdot 0,5 \text{ Nm}}{0,005 \text{ m}} = \underline{628,3 \text{ N}}$$

kde:

F	N	síla šroubu v axiálním směru
M _z	Nm	moment vyvolaný krokovým motorem
P	m	stoupání závitu šroubu

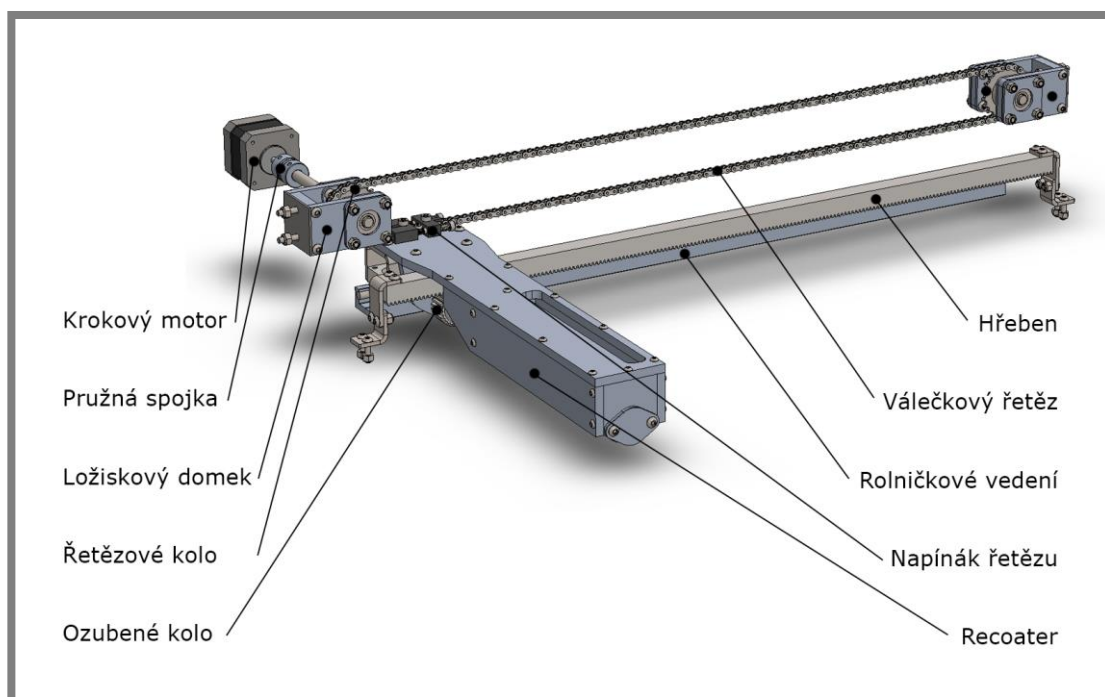
Výsledkem tohoto výpočtu je síla vyvinutá při konstantní rychlosti, bez převodového poměru, účinnosti mechanismu a tření o-kroužku platformy. V případě změny rychlosti osy Z se síla spolu s velikostí zrychlení zvětší. Jelikož je možné zrychlení osy softwarově upravit a vypočtená síla je při převodovém poměru 5:1 a započtení účinnosti kuličkového šroubu 0,97 stále více jak padesátinásobně větší, než je třeba k uzvednutí břemene, nehrozí přetížení a ztráta kroků motoru.

5.3 Nanášecí mechanismus

Sestava nanášecího zařízení slouží k nanesení vrstvy prášku ve stavěcím objemu a je zobrazena na obr. 46. Celá sestava je kromě krokového motoru umístěna v komoře a je navržena tak, aby byla schopna odolávat zvýšeným teplotám. Sestava je složena z recoateru a mechanismu, který umožňuje jeho pohyb. Recoater je rotačního typu. Jedná se o válec připevněný v těle recoateru, vytvořeného z hliníkových plechů tloušťky 6 mm. Pohyb recoateru zajišťuje krokový motor, který přenáší sílu přes válečkový řetěz typu 04 B-1. Recoater je upevněn na rolničkovém vedení. Rotaci válce recoateru zajišťuje ozubené kolo s modulem 1 a počtem zubů 21 a hřeben. Rolničkové vedení bylo vybráno proto, že neobsahuje žádné plastové části a lze ho tedy po nahrazení maziva ve valivých ložiscích použít ve vyšších teplotách. Ze stejného důvodu byl zvolen pro pohyb mechanismu řetěz místo řemenu. Řemeny vhodné do vysokých teplot, které zvládnou dlouhodobě teplotu maximálně 130 °C a jsou poměrně nákladné. Mazivo řetězu bylo také nahrazeno za mazivo do teploty 200 °C.

Tolerance výšky recoateru nad pracovní rovinou nemusí být příliš nízká, jelikož výška každé nanášené vrstvy, je závislá na posuvu platformy v ose Z, a ne na výšce recoateru nad pracovní rovinou. Také zde nehraje roli výška první vrstvy, jelikož první vrstva je stavěna přímo do prášku, a ne na platformě tak jako u procesu SLM.

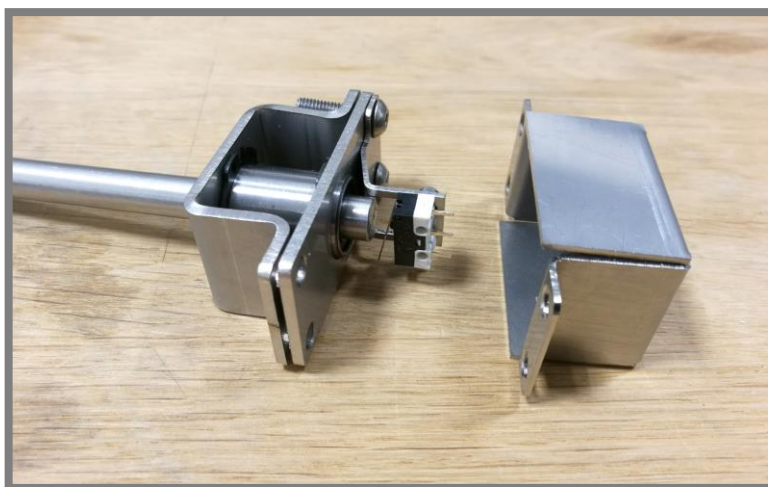
Koncový spínač nanášecího mechanismu nebylo možné umístit dovnitř komory, proto je umístěn vně a spíná se pomocí tyče uložené v lineárním ložisku. Tato tyč je ve stěně komory vzduchově utěsněna. Fotografie koncového spínače je na obr. 48.



Obr. 46 Model sestavy nanášecího mechanismu



Obr. 47 Kompletní nanášecí mechanismus

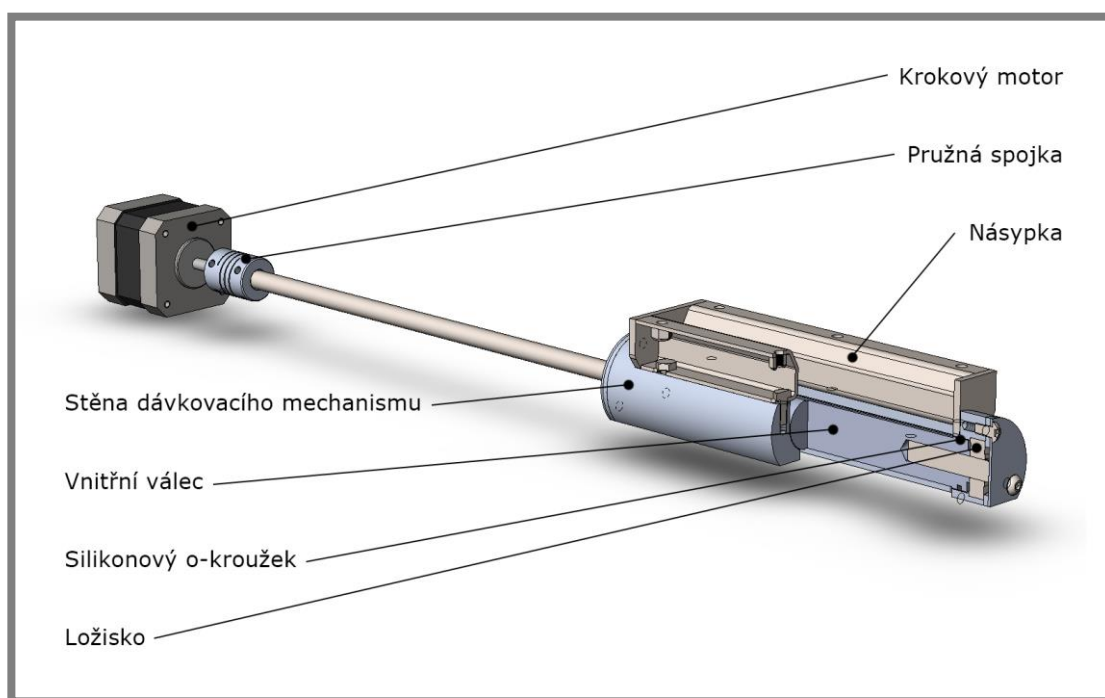


Obr. 48 Rozložený koncový spínač nanášecího mechanismu

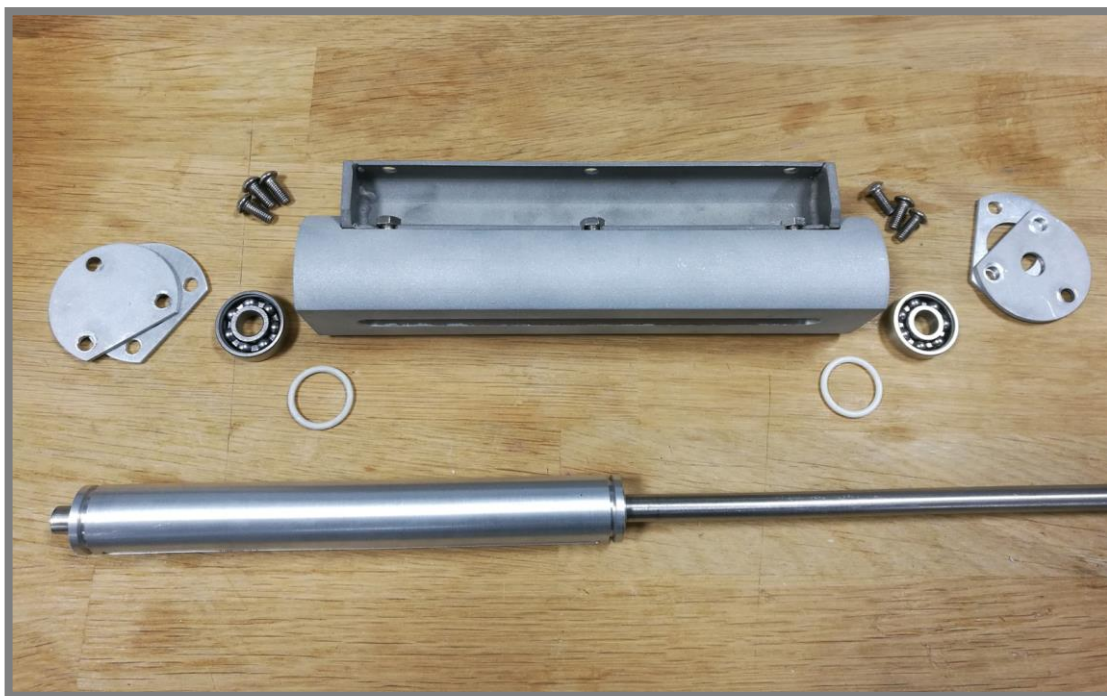
5.4 Dávkovací mechanismus

Dávkovací mechanismus je určený k přesouvání určitého množství prášku ze zásobníku prášku do recoateru. Model sestavy dávkovacího zařízení je zobrazen na obr. 49. Hlavní částí dávkovacího mechanismu je tlustostěnná hliníková trubka o vnějším průměru 40 mm a tloušťce stěny 10 mm. Uvnitř této trubky je na ložiskách rotačně uložen válec průměru 19,5 mm se dvěma drážkami. Objem každé drážky je shodný s objemem prášku pro jednu vrstvu výšky 0,02 mm, což je největší dělitel používaných výšek vrstvy. K válci je dále připevněna násypná část, která je svařena z nerezových plechů tloušťky 1,5 a 3 mm metodou TIG. Drážka ve válci uvnitř trubky přesouvá prášek z horní části zařízení do dolní a tím dávkuje prášek do recoateru. Na válci jsou umístěny dva silikonové o-kroužky, které zabraňují vniku prášku do nezakrytovaných ložisek. Rozložený dávkovací mechanismus je na obr. 50.

Pro určení ideálního průměru válce a tvaru drážky byla vyrobena sada prototypů válců pomocí FDM 3D tisku. Plastové prototypy je možné vidět na obr. 51. Na základě těchto prototypů bylo možné říci, že má drážka ve válci zanedbatelnou funkci, jelikož se zaplní práškem, který již nevypadává. Přesun prášku je způsoben pouze zachytáváním částic po obvodu válce pohybem v mezeře mezi vnitřním válcem a vnější trubicí. Z tohoto důvodu také není nutné znát přesnou polohu natočení válce.



Obr. 49 Model dávkovacího zařízení



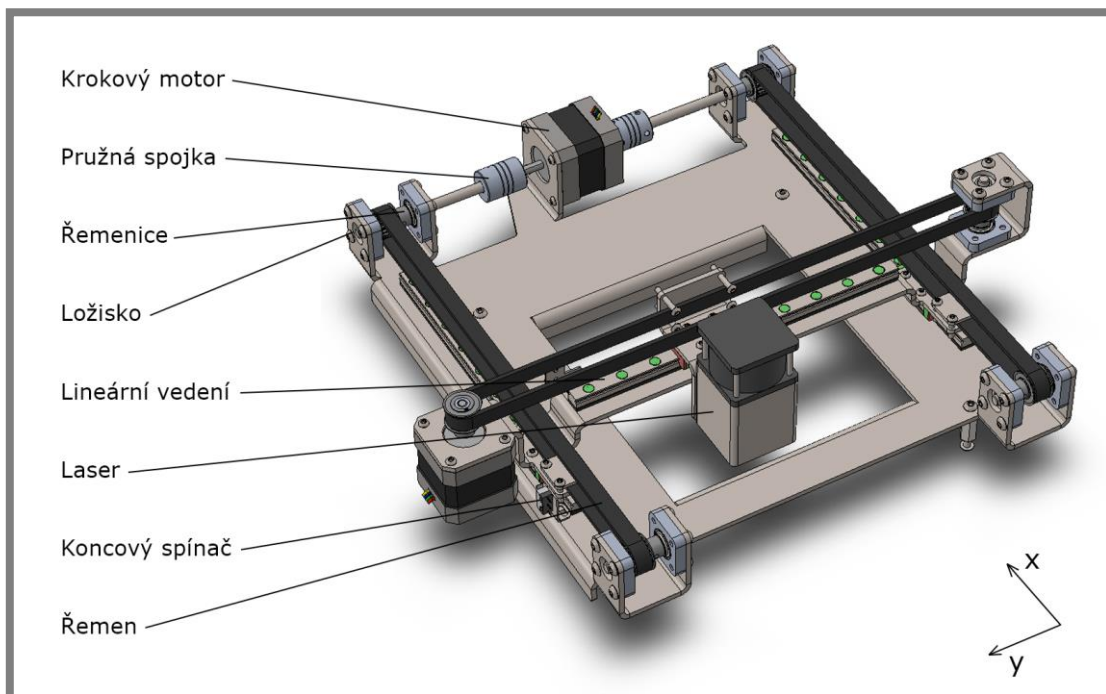
Obr. 50 Rozložený dávkovací mechanismus



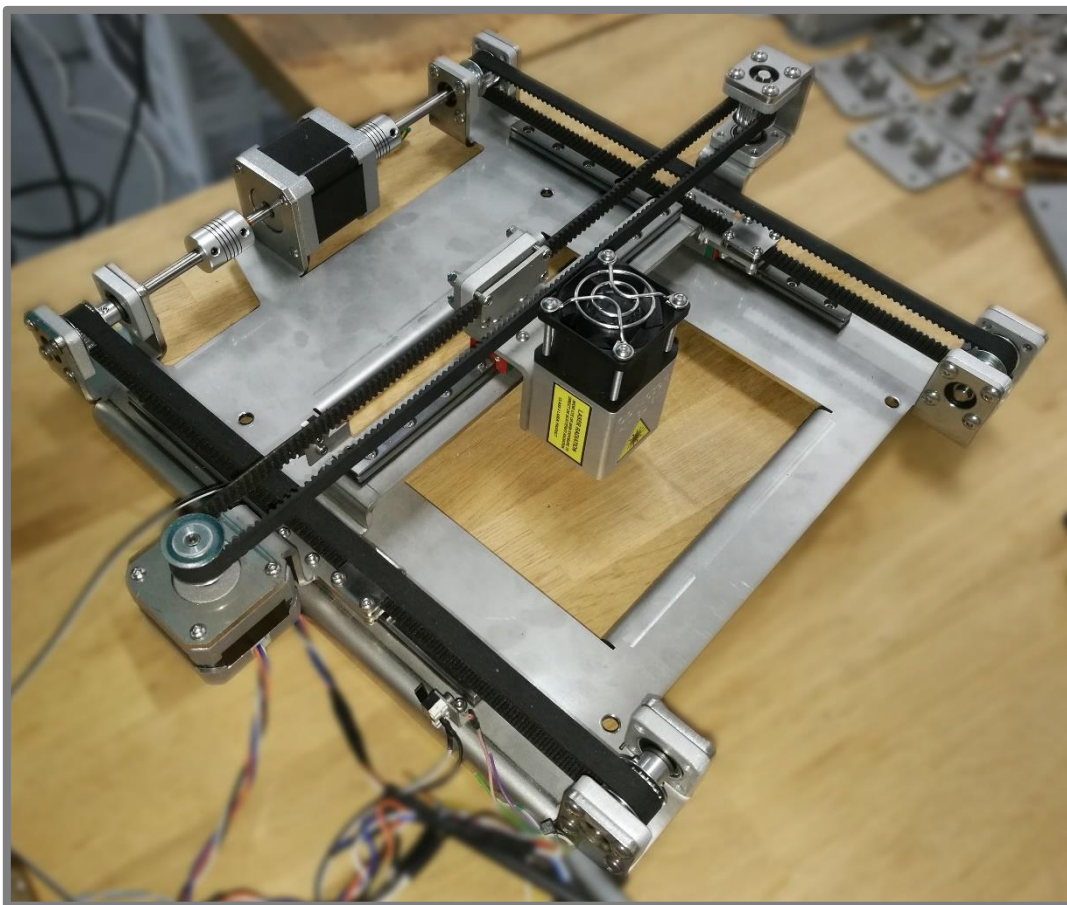
Obr. 51 Vytisknuté plastové prototypy válce dávkovacího mechanismu

5.5 Mechanismus pohybu laseru

V následující kapitole je popsán mechanismus, který pohybuje laserem nad stavěcí plochou. Pro pohyb byl vybrán klasický kartézský mechanismus, který je zobrazen na obr. 52. Základním prvkem mechanismu je nerezový plech tloušťky 3 mm. Ze stejného plechu je i tělo osy X. Lineární vedení mechanismu je tvořeno sestavou kolejnic a vozíků z řady miniaturního vedení MGN velikosti 9. Pro pohon slouží dva krokové motory NEMA 17, které s mechanismem pohybují pomocí standardních neoprenových řemenů velikosti HTD 3M a šířky 9 mm. Motor na ose X má hřídele na obou stranách a statický moment 0,6 Nm. Na ose Y je motor se statickým momentem 0,3 Nm. Hmotnost tohoto motoru je jedna z nejnižších pro nabízené motory prodejcem Microcon. Řemenice mají 18 zubů a každá je uložena ve dvou ložiskách. Laserový svazek do komory proniká skrz běžné tabulové sklo tloušťky 2 mm, umístěné v utěsněném rámečku pod tímto mechanismem. Fotografie sestaveného mechanismu je na obr. 52.



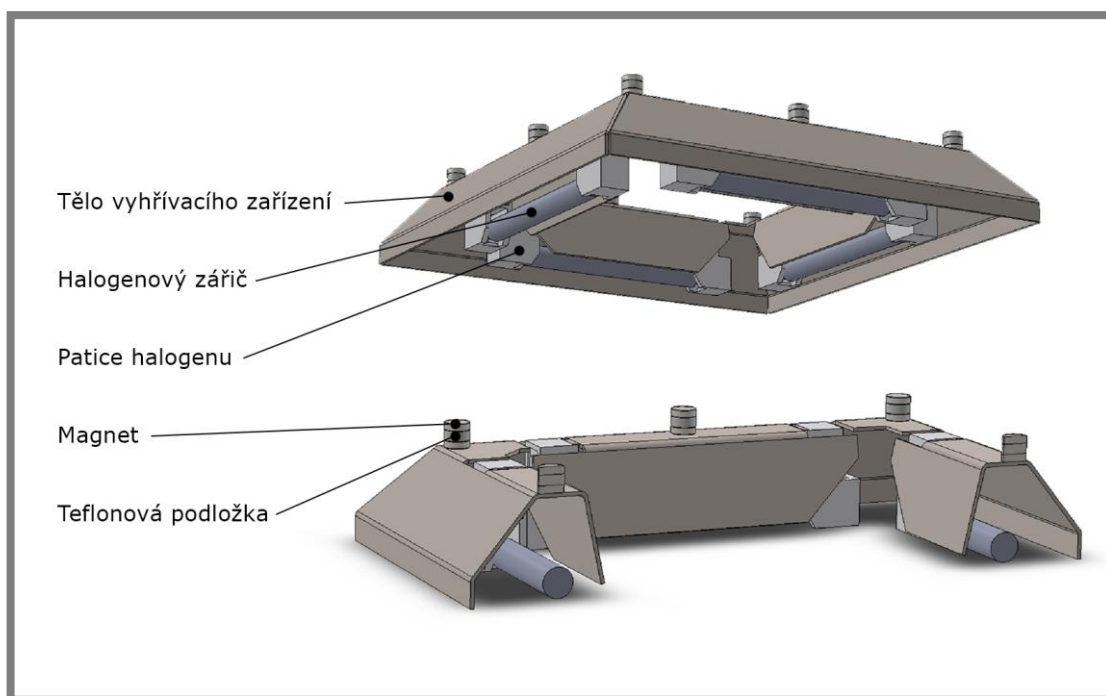
Obr. 52 Model mechanismu pro pohyb laseru



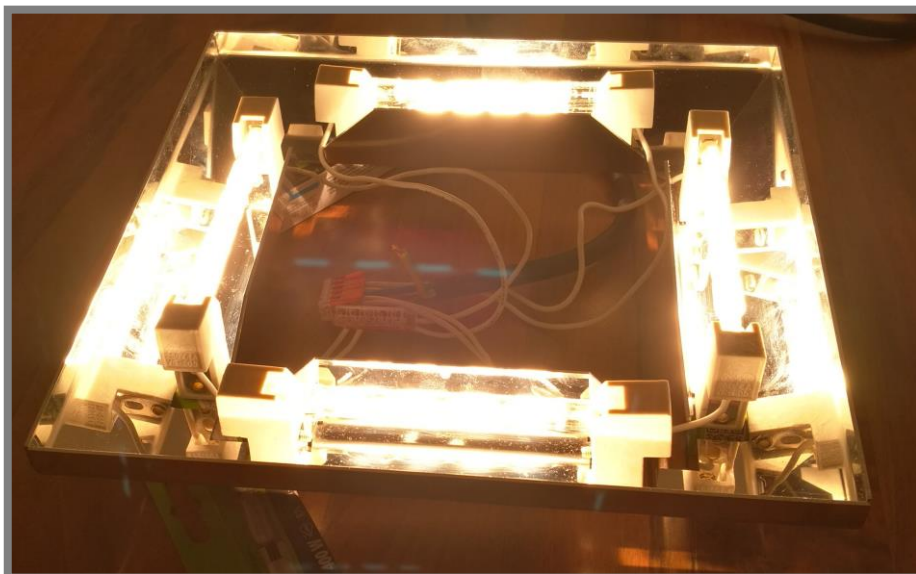
Obr. 53 Sestavený mechanismus pro pohyb laseru

5.6 Vyhřívací zařízení

Vyhřívací zařízení je složeno z plechového těla, čtyř halogenových zářičů výkonu 400 W a osmi paticemi zářičů. Celkový výkon zářičů je 1600 W. Sestavu vyhřívacího zařízení je možné vidět na obr. 54. Tělo zářiče je vyrobeno z nerezového plechu tloušťky 1,5 mm z jednoho kusu s povrchovou úpravou super lesk. Kromě uchycení patic zářičů slouží rámeček i jako reflektor, čímž zvyšuje intenzitu záření na požadovanou plochu a stíní záření směřujícímu mimo komoru skrz průhled pro laser. Vzhledem k tomu, že má rámeček během výhřevu poměrně vysokou teplotu, je ke komoře připevněn neodymovými magnety určenými pro teploty do 200 °C, mezi nimiž jsou teflonové podložky. Životnost halogenových trubice je výrobcem udávána na 100 000 sepnutí. Vzhledem k tomu, že teplota povrchu halogenových zářičů může dosahovat teplot nad 500 °C, je nutné halogenové zářiče udržovat čisté a nezanechávat na nich otisky prstů, jejichž složky zahřáté na vysoké teploty by mohly povrch zářiče poškodit. Halogenové zářiče byly zvoleny především kvůli jejich příznivé ceně. V profesionálních strojích jsou používány quartz trubice, jejichž cena se pohybuje řádově v tisících korun. Tyto trubice se však v délce do 200 mm neprodávají, bylo by tedy nutné vyhotovit je na zakázku. Výhoda quartz trubic je v tom, že rychlost náběhu na maximální teplotu je méně než 2 s. Halogenovou trubicí o výkonu 400 W je možné koupit do 50 Kč za kus. Sestavené, aktivní zařízení je zobrazeno na obr. 55.



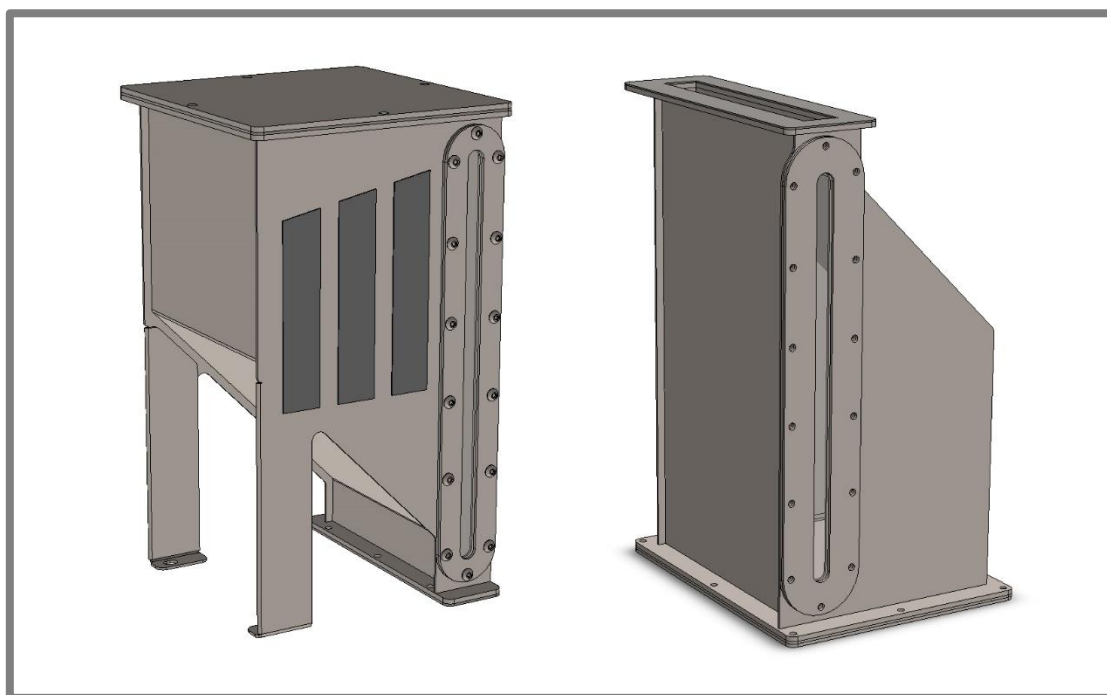
Obr. 54 Model vyhřívacího zařízení



Obr. 55 Aktivní vyhřívací zařízení

5.7 Zásobník prášku a odpadní nádoba

Zásobník prášku i odpadní nádoba jsou svařence téměř shodných konstrukcí vytvořených z nerezových plechů tloušťky 1,5 a 3 mm. Tyto plechy byly svařeny metodou TIG. Model zásobníku prášku a odpadního prostoru je zobrazen na obr. 56. Svařence jsou tvořeny čtyřmi stěnami a dvěma přírubami. Boční stěny jsou vůči přední a zadní stěně přesazeny pro možnost vytvoření koutového svaru. Na nádobách je pomocí šroubového spoje umístěno víko pro možnost přístupu dovnitř nádob. Objem nádob je o 50 % větší než maximální objem stavěcího prostoru. Zásobník prášku je součástí pneumatického okruhu pro přívod inertního plynu, jelikož v případě plnění komory inertním plynem při naplněném zásobníku by v horní části zásobníku zůstal vzduch, který by přes prášek postupně unikal dovnitř komory. Ve stěně nádob je vytvořený průhled pomocí plexiskla, pro možnost kontroly množství prášku v zásobníku.



Obr. 56 Zásobník prášku (vlevo) a odpadní nádoba (vpravo)

5.8 Kryty přístroje

5.8

Krytování přístroje je tvořeno broušenými plechy z nerezové oceli. Obvodové stěny, boční dvířka elektroniky a odpadní nádoby a přední spodní dvířka jsou z tloušťky 1 mm. Horní stěna je z důvodu nosné funkce z tloušťky 2 mm. Kryty jsou vůči rámu přístroje odsazeny o 10 mm pomocí nylonových sloupků. Tímto je dosaženo menšího tepelného přenosu z vyhřáté komory na krytování. Přední spodní dvířka mají po obvodu lemy z důvodu vyšší tuhosti. Zadní stěna je rozdělena na dvě části. Horní část zadního krytování slouží jako servisní kryt, který je možné snadno sejmout a mít tak přístup k mechanismu pro pohyb recoateru. Tato horní část krytu má díry pro šrouby ve formě zámků, aby bylo možné šrouby krytu pouze povolit a nemusely se vyšroubovat. Ve dvířkách elektroniky je umístěno bezpečnostní tlačítko, dýzy ventilátorů zdrojů a panel se dvěma displeji, na které je možné zobrazovat doplňující informace o přístroji, např. teploty v různých částech komory. V bočním krytu pod elektronikou se nachází konektor USB-B pro připojení k počítači. Madla dvířek i panty jsou rovněž vyrobeny z nerezových plechů.

Dvířka komory jsou tvořena rámem z hliníkových profilů a nerezovými plechy tloušťky 1 mm a 2 mm. Ve dvířkách je průhled velikosti (200 x 100) mm tvořený optickým plexisklem, které nepropustí laserové záření vlnové délky použitého diodového laseru.

5.9 Řídicí systém

5.9

5.9.1 Elektronika

5.9.1

Jádrum řídicího systému je Arduino, počítač založený na mikroprocesoru ATmega firmy Atmel. Na této desce je umístěn tzv. shield, Ramps 1.4. Na shieldu je připojeno pět driverů pro krokové motory s označením DRV8825.

Ke každému z driverů je připojen krokový motor příruby NEMA 17. Počet mikrokroků motoru se určuje propojením určité kombinace tzv. jumperů pod jednotlivými drivery. V případě zmíněného typu driveru se propojením všech tří jumperů definuje 32 mikrokroků na celý krok motoru. V případě zmíněného motoru je to 6400 kroků na otáčku. Dva motory slouží pro řízení pohybu laseru v ose X a Y, další pro pohyb platformy v ose Z a zbylé dva pro pohyb nanášecího a dávkovacího mechanismu. Krokové motory jsou zapojeny sériově.

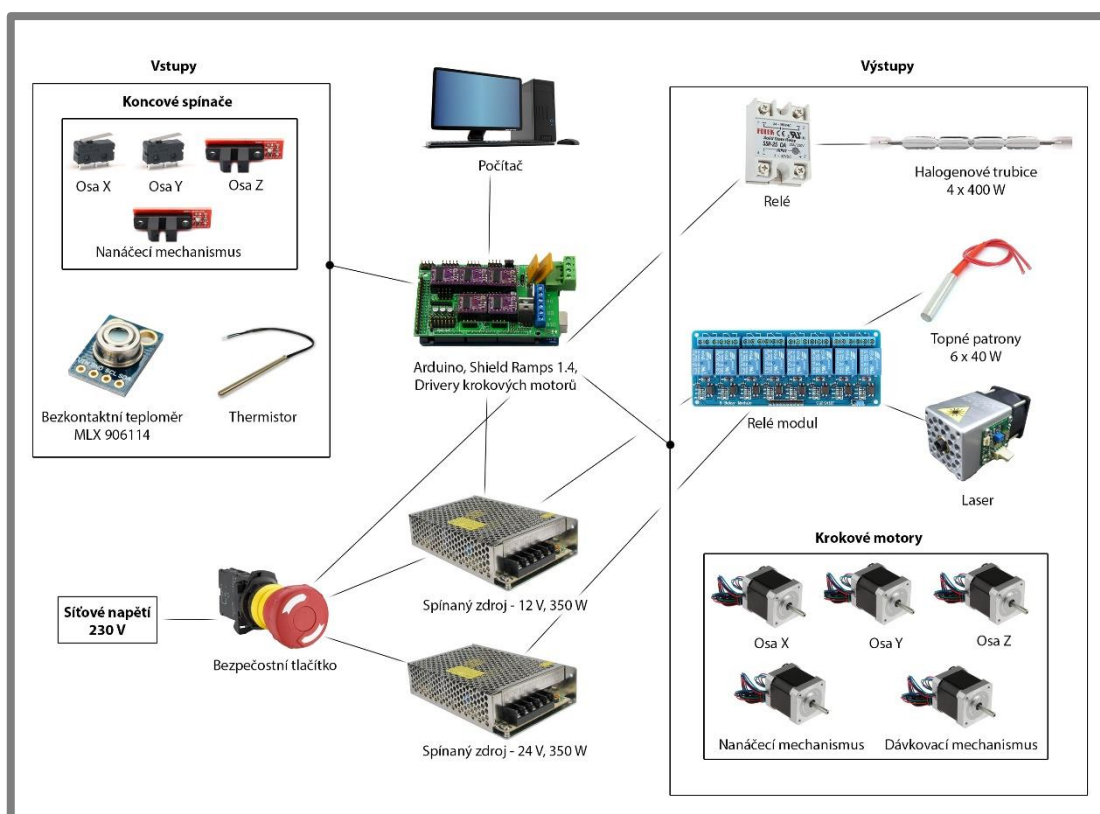
Do shieldu Ramps 1.4 jsou dále připojeny dva mechanické koncové spínače pro osu X a Y. Pro osu X je spínač v minimu rozsahu pohybu a pro osu Y v maximu. Všechny mechanické koncové spínače jsou připojeny následně: COM (pin pod patou packy spínače) na zemnicí pin a NO (prostřední pin spínače) na signálový pin. Optický koncový spínač osy Z je připojen v minimu rozsahu pohybu a propojení pinů odpovídá pinům napsaným na spínači. Termistor vyhřívací platformy je připojen na pinech T1. Na kombinaci zapojení pinů termistoru nezáleží, jelikož se jedná o senzor založený na měření odporu. Ovládací piny laseru jsou připojeny na pin D11 a zem. Modul bezkontaktního teploměru je zapojen na pinech 20,20 a je napájen pěti volty. Teploměr měří teploty v rozsahu od -70 do 382 °C. Při pokojové teplotě měří s přesností 0,5 °C.

Pro ovládání 12V napětí jsou na Rampsu 1.4 přichystány tři tranzistory. Tyto tranzistory původně slouží pro řízení vyhřívání heatbloku extruderu, vyhřívání podložky a ventilátoru extruderu. V případě SLS tiskárny je potřeba podobně spínat vyhřívání platformy, halogenové trubice a případně napájecí napětí laseru. Tranzistory

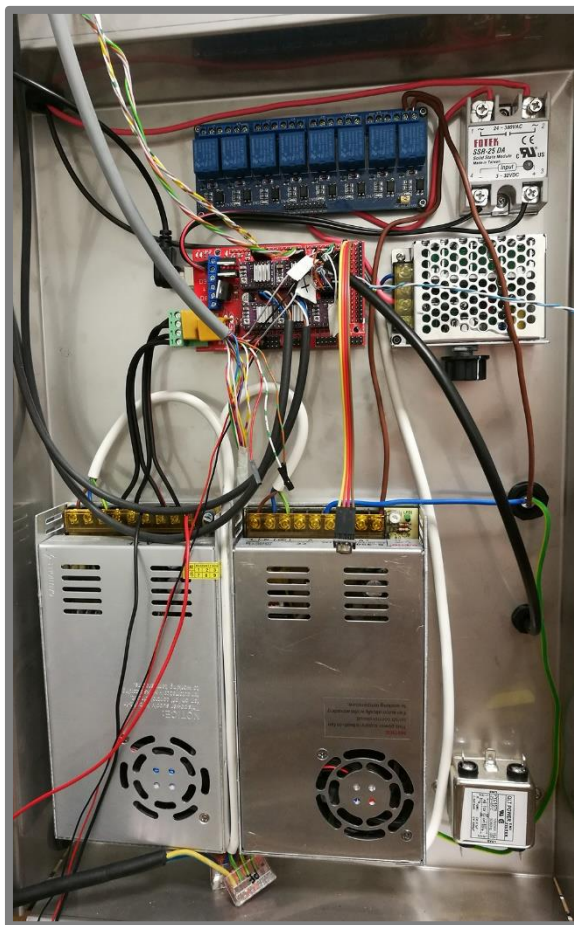
však nejsou určeny pro potřebný typ a velikost napětí. Ovládací piny těchto tří tranzistorů jsou proto pozměněny a vyvedeny na volné piny, pomocí nichž jsou řízeny relé umístěné na modulu a samostatné relé pro střídavé napětí halogenových zářičů. Pin pro ovládání topných patron je změněn na pin 32, pro halogenové zářiče na pin 47 a napájecí napětí laseru 43.

Elektronika obsahuje 12V a 24V zdroj. Dvanácti volty je napájen Ramps 1.4 a 24 V je pro topné patrony. Topné patrony je možné pořídit i pro 12 V. Vzhledem k celkovému výkonu patron 240 W by kabely a konektorem muselo procházet 20 A. V případě 24 V jen 10 A, což je i maximální proud dovolený pro běžné relé moduly Arduina.

Ve dvířkách elektroniky je umístěn panel se dvěma displeji, které jsou připravené pro zobrazování potřebných hodnot, jako například teplotu uvnitř komory či jiných částech stroje. K zajištění dvířek komory a krytu laseru slouží elektrické zámky a optické brány. Laser není možné spustit, pokud optické brány nedetekují zavření krytu a dvířek. Pro tento účel elektronika obsahuje samostatné Arduino nano, které vykonává příkazy nesouvisející přímo s výrobou. Dále zajišťuje výstupy pro displeje ve dvířkách elektroniky a také spíná led pásek umístěný v krytu laseru. Schéma zapojení elektroniky je na obr. 57. Elektronika nesouvisející s výrobním procesem není v elektrickém schématu zobrazena.



Obr. 57 Schéma zapojení elektroniky



Obr. 58 Elektronika

5.9.2 Firmware

5.9.2

Pro tuto aplikaci byl zvolen Repetier-Firmware. Tento firmware byl vybrán proto, že obsahuje připravený kód pro řízení laseru, je možné řídit přídatné krokové motory a další koncové spínače. Firmware je volně stažitelný z internetu ve formě kódu pro arduino. Obsahuje několik tzv. projektů, přičemž tím nejdůležitějším pro uživatele je Configuration.h, kde je možné nastavit parametry přístroje a elektroniky. Repetier také umožňuje nastavení všech parametrů v aplikaci na internetových stránkách, a poté stáhnutí firmware již s těmito parametry.

Ve firmwaru je třeba správně definovat typ řídicí elektroniky, v tomto případě Rams 1.4. Rychlost komunikace, tzv. baudrate a pin, kterým bude řízen výkon laseru. Tento digitální pin musí být na Arduinu Mega podporovaný pro PWM signál. Dále koncové spínače a jejich umístění na jednotlivých osách. Poté je také možné nastavit počet kroků krokového motoru na milimetrový posuv os, správný směr pohybu a maximální rychlost, zrychlení a ryv. Tyto a další parametry důležité při kalibraci přístroje je ale možné měnit také v řídicím programu díky vnitřní paměti Arduina EEPROM. Do firmwaru je navíc přidán kód pro bezkontaktní teploměr MLX90614 namísto termistoru původně určeného pro měření teploty extruderu FDM tiskárny.

5.9.3 Software

Pro řízení přístroje je použit software Repetier-Host a pro generování g-kódu software slic3r. Software slic3r je v Repetier-Hostu implementovaný jako plugin. Slic3r umožňuje přidání části g-kódu před, nebo za kompletní kód a před, nebo za vrstvu dílu. Tohoto je využito pro řízení laseru a pohybu dávkovacího a nanášecího mechanismu. G-kód pro řízení výkonu laseru je ve tvaru M3 S(0-255) a je použit na začátku g-kódu. Hodnota 0-255 vyjadřuje míru výkonu laseru. Laser se po tomto příkazu spustí při každém příkazu pro lineární pohyb G1 a vypne se při příkazu G0. Pro řízení dvou dalších krokových motorů slouží následující příkazy. P0 je označen motor nanášecího mechanismu a P1 dávkovacího mechanismu.

G201 P0 X10 jed' na pozici X10 motorem P0
 G202 P0 X10 nastav pozici motoru P0 na X10
 G203 P0 vypiš aktuální pozici motoru
 G204 P0 S(0/1) vypni/zapni motor P0
 G205 P0 jed' do výchozí pozice

Vhodnou kombinací těchto příkazů je docíleno toho, že dávkovací zařízení nasype určité množství prášku před nanášecího zařízení, a poté přejede o danou vzdálenost přes komoru k odpadnímu otvoru a zpět.

5.10 Cenový rozpočet

Tab. 4 Cenový rozpočet

Diodový laser a ochranné brýle	17165 Kč
Elektronika	6790 Kč
Mechanické komponenty pro mechanismus pohybu v ose Z	3500 Kč
Mechanické komponenty pro mechanismus pohybu laseru	1700 Kč
Mechanické komponenty pro nanášecí mechanismus	3600 Kč
Mechanické komponenty pro dávkovací mechanismus	130 Kč
Komponenty pro vyhřívací zařízení	450 Kč
Mechanické komponenty pro komoru	6200 Kč
Pneumatické komponenty pro přívod inertní atmosféry	400 Kč
Spojovací materiál	1000 Kč
Silikonové těsnění	1500 Kč
Plechové díly	15000 Kč
Celkem	57500 Kč

5.11 Ověření funkce

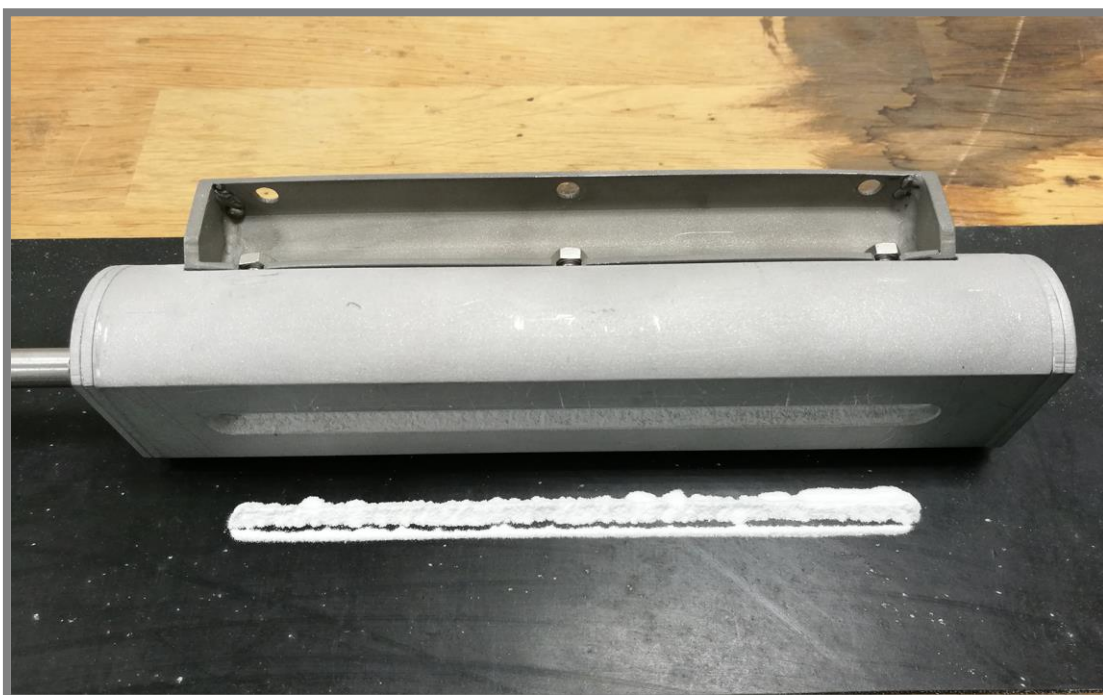
5.11

Konstrukce 3D tiskárny je schopna samostatně nanášet a spékat vrstvy prášku. Dávkovací mechanismus spolehlivě přesouvá prášek ze zásobníku prášku do prostoru komory. Nanášecí mechanismus vytvoří rovnoměrnou homogenní vrstvu prášku po celé délce komory a přebytek prášku přesune do odpadního otvoru. Mechanismus pro polohování platformy v ose Z je schopný s dostatečnou opakovatelností polohovat s platformou o zvolenou výšku vrstvy prášku. Platformu je možné vyhřát na teplotu 150 °C. Vyhřívací zařízení umožňuje vyhřátí prášku až na teplotu odpovídající teplotě tavení, tedy 176 °C. Mechanismus pro pohyb laseru samostatně polohuje laser podle určených drah. Celý proces je řízen elektronikou s upraveným firmwarem. Komora tiskárny je připravena k připevnění dvířek a přivedení inertní atmosféry.

5.11.1 Dávkovací mechanismus

5.11.1

Mechanismus určený pro přesouvání prášku ze zásobníku prášku před válec nanášecího zařízení je schopný nanést množství prášku po celé délce válce rovnoměrně. Výsledek testu pro ověření funkčnosti tohoto mechanismu je možné vidět na obr. 59.



Obr. 59 Ověření funkce dávkovacího mechanismu

5.11.2 Nanášecí mechanismus

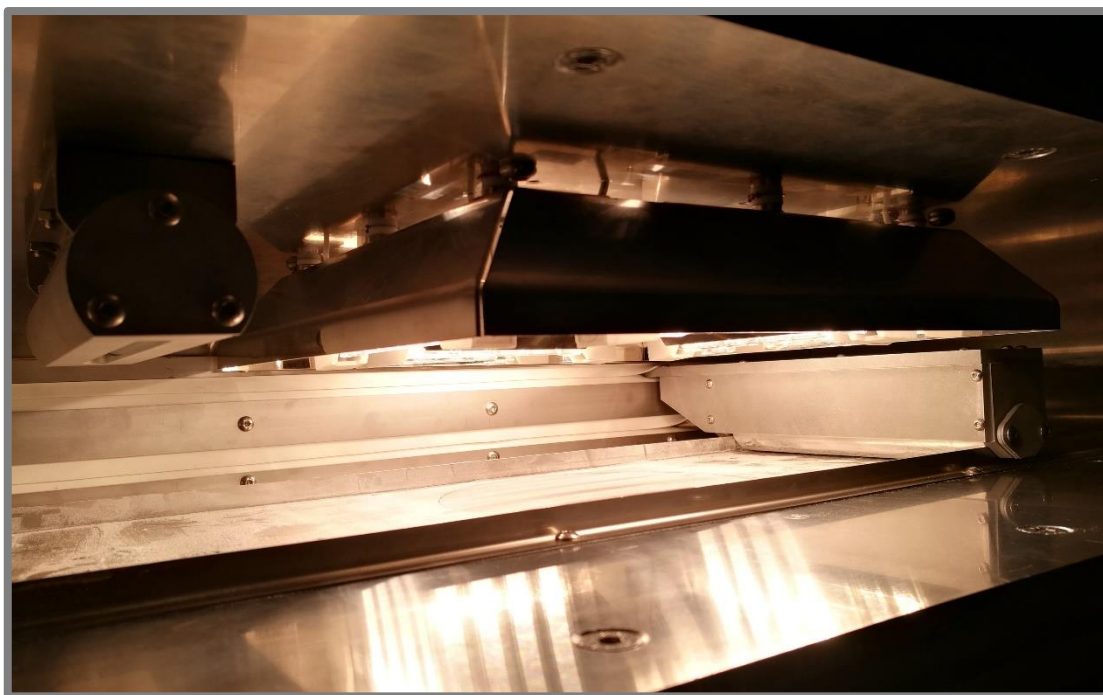
Nanášecí zařízení umožňuje samostatně nanést homogenní vrstvu prášku, jak je vidět na obr. 60. Recoater nanese vrstvu prášku po celé délce komory a vrátí se zpět do výchozí pozice, kde čeká, dokud laser nedokončí sintrování vrstvy.



Obr. 60 Vrstva nanesená nanášecím zařízením

5.11.3 Vyhřívací zařízení

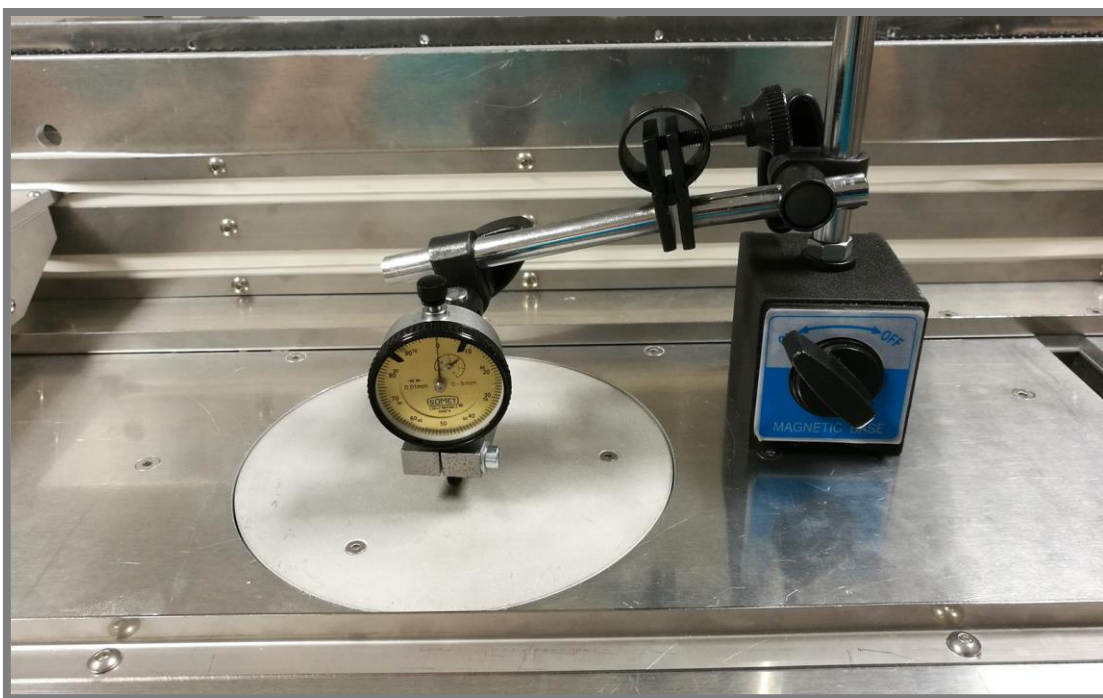
Vyhřívací zařízení je schopno vyhřívat nanesený povrch vrstvy na dostatečnou teplotu pro proces sintrování. Fotografie aktivního zařízení je na obr. 61.



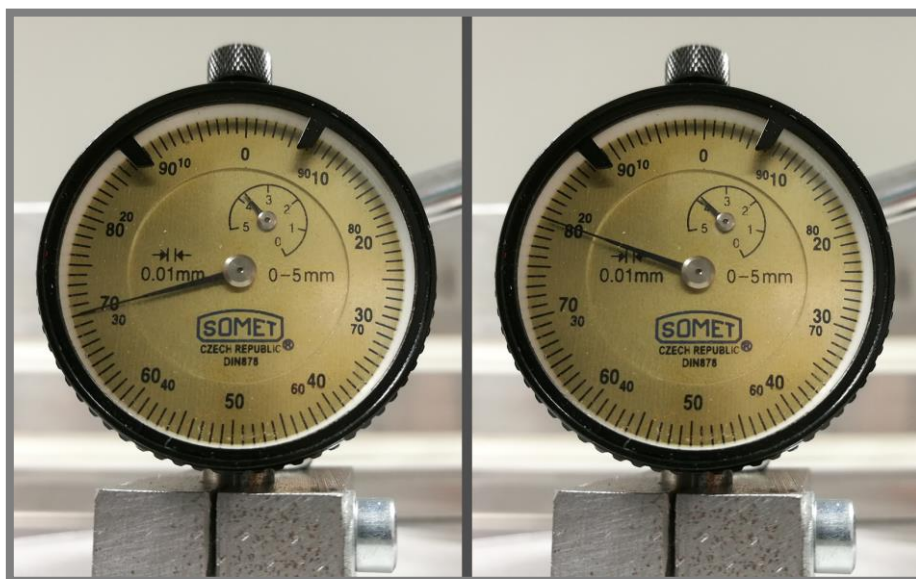
Obr. 61 Funkční vyhřívací zařízení

5.11.4 Mechanismus pohybu v ose Z a výhřev platformy

Stavěcí platformu je možné pomocí pohybového mechanismu posouvat o zvolenou výšku vrstvy s dostatečnou přesností a opakovatelností. Přesnost posuvu při změně pozice platformy byla ověřena pomocí úchylkoměru. Fotografie z měření je možné vidět na obr. 62. Během měření byla sledována změna polohy platformy při pohybu dolů o velikost 0,1 mm. Číselník úchylkoměru při změně polohy z 0,7 mm na 0,8 mm je možné vidět na obr. 63. Celková testovaná vzdálenost byla 5 mm s krokem 0,1 mm. Z měření plyne, že platforma je schopna spolehlivě vytvářet zvolenou výšku vrstvy.

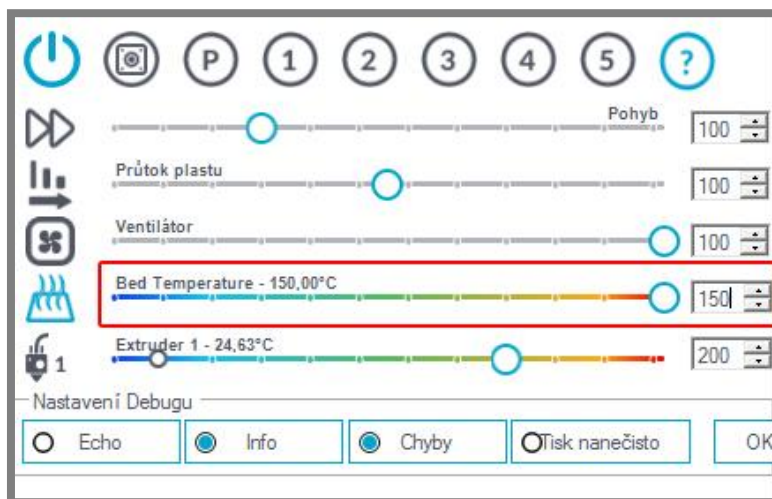


Obr. 62 Měření posuvu platformy úchylkoměrem



Obr. 63 Posuv platformy o vzdálenost 0,1 mm

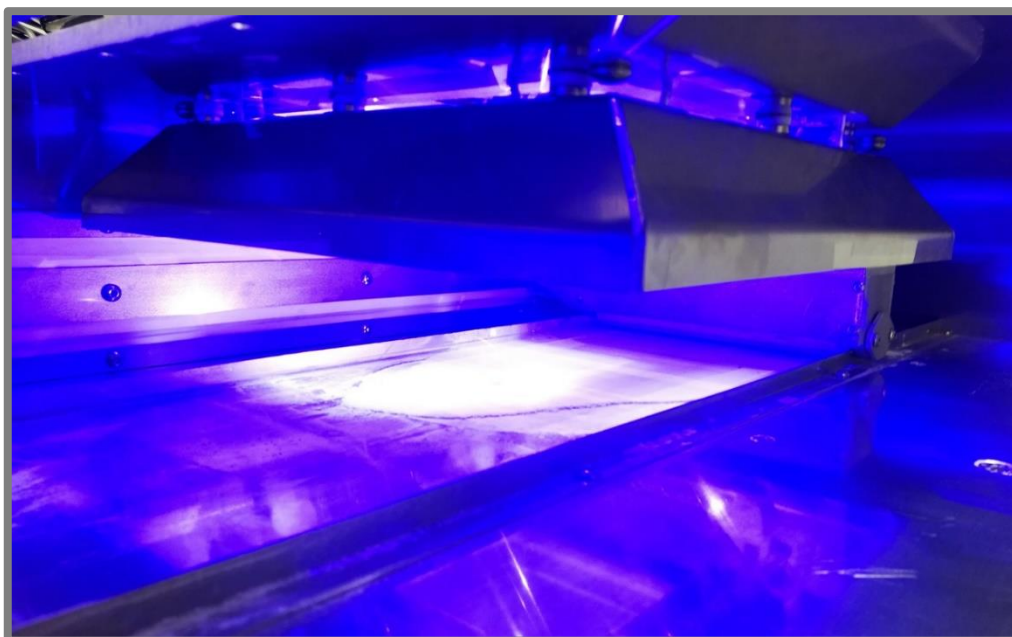
Také bylo ověřeno, že je možné platformu vyhřát na 150 °C. Měření teploty bylo provedeno pomocí termistoru umístěného v platformě a softwaru pro řízení tiskárny. Hodnotu teploty platformy v softwaru Repetier-Host je možné vidět na obr. 64. Hodnota pro podložku je vyznačena červeně. Hodnota vpravo představuje nastavenou hodnotu a hodnota za textem „Bed Temperature“ měřenou teplotu. Této hodnoty bylo dosaženo po deseti minutách výhřevu šesti patronami celkového výkonu 240 W.



Obr. 64 Ověření výhřevu platformy

5.11.5 Mechanismus pohybu laseru

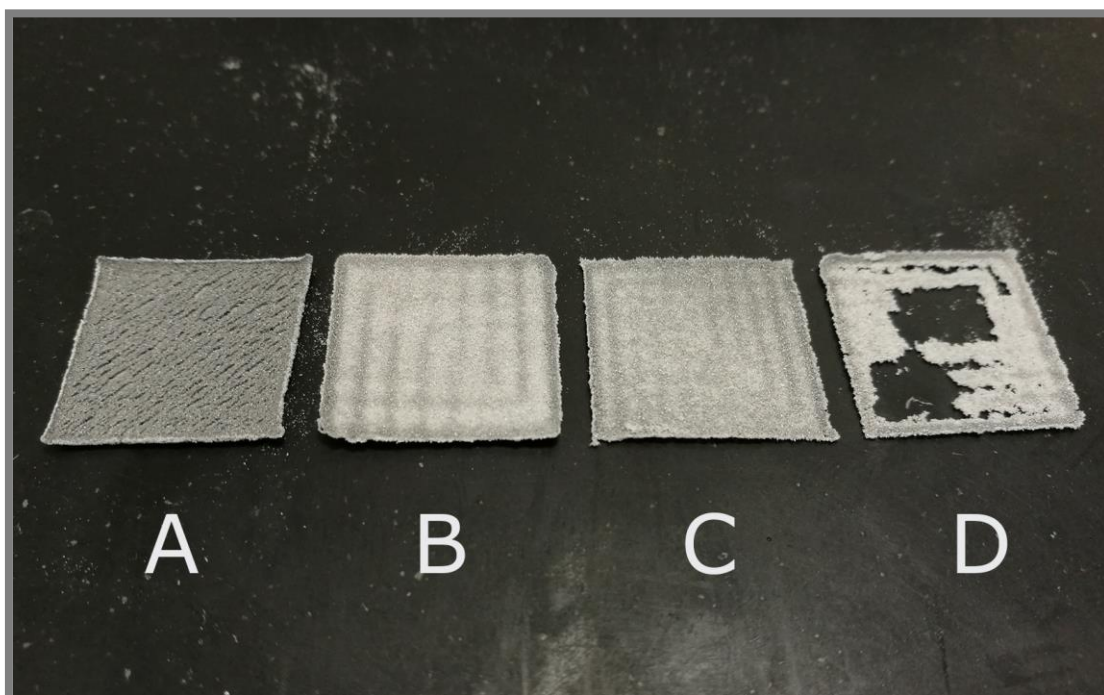
Mechanismus umožňuje pohybovat s tělem laseru rychlostí až 175 mm.s^{-1} podél drah vygenerovaných na základě tvaru dílu. Fotografie pořízena při pohybu laseru a sintrování prášku je na obr. 65. Hodnota počtu mikrokroků pro posuv os je nyní pouze spočítána a zadána ve firmwaru. Přesnější kalibrace posuvu bude možná až na základě vyrobených objemových dílů.



Obr. 65 Sintrování materiálu laserem

5.11.6 Výroba vzorků

Na obr. 66 je možné vidět sérii vzorků vyrobených na sestavené SLS 3D tiskárně. Tyto vzorky byly vyrobeny při různých teplotách předehřevu prášku a s různou hustotou aplikované energie. Velikost vzorku je (20 x 20) mm. Všechny vzorky byly vyrobeny při maximálním výkonu laseru, tedy 6 W. Skenovací rozteč byla 0,2 mm. V tab. 5 je teplota prášku a rychlost laseru pro jednotlivé vzorky. Trend ukazuje, že při vyšší teplotě je podle očekávání možné použít nižší hustotu energie. Při zpracování prášku technologií SLS je velmi důležitý předehřev prášku. Jak je na vzorcích patrné, kraje jsou zkroucené a vystupují nad rovinu vzorku. Experimenty s práškem, které budou mít za cíl najít správné procesní parametry pro daný materiál, by mohly postupovat následovně. Teplota předehřevu platformou by měla být 150 °C. Předehřev horní vrstvy by měl být nastaven na teplotu 12 °C pod teplotou, při které se začne prášek spékat. Rychlost pohybu laseru by měla být zvyšována do té míry, dokud nebudou patrné přepálené okraje, které značí zvýšenou hustotu energie vlivem nízkého zrychlení pohybu. Při této rychlosti by se měl zvyšovat výkon laseru od nuly, dokud nebude mít vrstva celistvou strukturu. Jakmile nebude první vrstva vystupovat nad okolní prášek, je možné nanést další vrstvu a vyrobit trojrozměrný díl.



Obr. 66 Sintrované vrstvy prášku při různých hustotách energie

Tab. 5 Parametry při výrobě vzorků

Vzorek	Teplota prášku (°C)	Rychlost laseru (mm.s ⁻¹)
A	150	150
B	100	150
C	100	175
D	25	175

6 DISKUZE

V současné době jsou jednotlivé části přístroje plně funkční. Dávkovací mechanismus je schopný spolehlivě dávkovat dané množství prášku. Nanášecí mechanismus vytváří homogenní vrstvu prášku. Mechanismus osy Z je schopný pohybovat platformou v celém rozsahu o zvolenou výšku vrstvy. Platformu je také možné vyhřát na teplotu 150 °C. Vyhřívací zařízení je schopné prášek vyhřát na teplotu, při které se začíná spékat, tzn. 176 °C. Maximální rychlost pohybu mechanismu pro pohyb laseru byla dosažena 175 mm.s⁻¹. Zařízení je schopno sintrovat jednotlivé vrstvy Alumidového prášku.

Běžné tabulové křemenné sklo tloušťky 2 mm není ani po několika minutách působení 6W laserového svazku v jednom místě poškozeno. K poškození však dojde, pokud se na skle vyskytuje nečistota, která se vlivem laserového záření zahřeje a povrch skla poškodí. Proto je nutné udržovat sklo čisté.

Kabely krokových motorů bylo nutné vést každý zvlášť. V případě vedení kabelů více motorů společně v jednom svazku dochází k rušení signálu a motory se náhodně přestanou točit.

Čelní stěny svařovaných nádob, zásobníku prášku a odpadní nádoby, jsou vlivem tepelného ovlivnění při svařování prohnuté směrem dovnitř. Tomuto pronutí by se zabránilo navařením žeber napříč stěn. Vzhledem k prioritě snadné a levné výroby tomu tak nebylo při výrobě učiněno.

Rám halogenových zářičů by bylo vhodné vybavit průhledným sklem a zářiče tak izolovat od okolního prostředí, aby nedocházelo k natavování části na jejich povrch. Životnost halogenových zářičů je takto snižována.

Laserové záření vstupující do komory je uvnitř komory odraženo od stěn. Snížit míru odražení záření by bylo možné povrchovou úpravou stěn komory. Tato úprava by mohla být pískováním, nebo eloxováním na černo.

Vzhledem k tomu, že se jedná o experimentální zařízení, je často třeba oddělat stropní část komory. Aby toto bylo možné, je vždy nutné uvolnit dávkovací mechanismus. Tomuto by se dalo vyhnout upravením otvoru pro hřídel ve stěně komory mezi pracovní částí a částí pro mechanismus pohybu recoateru. Úprava by spočívala ve vytvoření otvoru ve tvaru drážky směřující od otvoru k horní hraně stěny. Hřídel nanášecího zařízení by se tak dala tímto otvorem protáhnout. Otvor by bylo vhodné utěsnit stejně jako otvory pro mechanismus.

Největší nevýhodou technologie SLS je poměrně malá dostupnost materiálů, jejich vysoká cena a malá recyklovatelnost prášku.

7 ZÁVĚR

7

Hlavním cílem diplomové práce je konstrukční návrh a realizace experimentální, nízkonákladové 3D tiskárny umožňující spékání polymerní práškové materiály. Hlavní cíl diplomové práce byl včetně dílčích cílů splněn.

Na základě rešerše byly vytvořeny varianty řešení, určeny procesní parametry, a zvoleny optimální varianty. Podle těchto variant se podařilo vytvořit konstrukční návrh, a sestavit 3D tiskárnu, umožňující tisk s polyamidového kompozitu s hliníkem, zvaným Alumid. Tiskárna umožňuje vytvářet vhodné procesní parametry pro tisk metodou selektivního spékání prášku. Zařízení je schopno nanést homogenní zhutněnou vrstvu prášku do stavěcího prostoru o zvolené výšce, tento prášek vyhřát tepelnými zářiči téměř na teplotu tavení materiálu a diodovým laserem o výkonu 6 W v místech průřezu dílu spékat. Zařízení také umožňuje stavěcí prostor, zaplněný dílem a okolním práškem vyhřívat na teplotu 150 °C. Pro ovládání tiskárny je použit upravený software.

Navazující práce by se měla zabývat upřesněním procesních parametrů pro tisk dílů v maximální možné kvalitě. Také by bylo vhodné nalézt více materiálů, které je možné zpracovat pomocí laseru. Při experimentech by měla být uvažována i dusíková inertní atmosféra, na jejíž použití je stroj připraven. Vyrobené experimentální zařízení bude dále využíváno k experimentálním a studijním účelům na Ústavu konstruování.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GOODRIDGE, R. D., C. J. TUCK a R. J M HAGUE. Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science* [online]. 2012, **57**(2), 229–267. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2011.04.001
- [2] MAZZOLI, Alida, Giacomo MORICONI a Marco Giuseppe PAURI. Characterization of an aluminum-filled polyamide powder for applications in selective laser sintering. *Materials and Design* [online]. 2007, **28**(3), 993–1000. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2005.11.021
- [3] EOS [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
- [4] 3D systems [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com>
- [5] Sharebot [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.sharebot.it/index.php/sharebot-snowwhite/?lang=en>
- [6] 3D print [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://3dprint.com/31111/sintratec-aluminm-material/>
- [7] Instructables [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/JRLS-1000-DIY-SLS-3D-PRINTER/>
- [8] Indiegogo [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.indiegogo.com/projects/you-sls-the-first-desktop-open-source-lasersinter#/>
- [9] OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE a K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* [online]. 2015, **74**, 401–477. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2015.03.002
- [10] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **1**, 77–86. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2014.08.001
- [11] Lintech [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co2-laser>
- [12] Lt [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.lt.cz>
- [13] Lao [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz>
- [14] Elektrorevue [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [15] Thorlabs [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com>
- [16] Mikac [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.mikac.cz/sketchup-model-laser.html>
- [17] Reprap [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://reprap.org>
- [18] Ultimachine [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://ultimachine.com>
- [19] Express stratasys direct [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://express.stratasysdirect.com>
- [20] Raylase [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.raylase.de/products/2-axis-deflection-units/>
- [21] Photobucket [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://i458.photobucket.com/albums/qq308/pegwood214/RAMPS-1-4->

- REPRAP-3D-PRINTER-CONTROLLER-Mega-2560-5-A4988-Drivers-Heatsink_zpsacuoebmh.jpg
- [22] *Maxdesign* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://maxdesign1990.wordpress.com/2016/05/22/gmtech-printer-motion-platform-research/>
- [23] *Optlasers* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://optlasers.com/en/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
3D	3 dimensions
CAD	Computer aided design
RP	Rapid Prototyping
AM	Additive Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
STL	STereoLithography
SLM	Selective Laser Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
TPU	Thermoplastic polyurethane

Veličina	Jednotka	Popis
F	N	síla šroubu v axiálním směru
M _z	Nm	moment vyvolaný krokovým motorem
P	m	stoupání závitu šroubu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**10**

Obr. 1 Díl vyrobený technologií SLS [19]	14
Obr. 2 Popis hlavních částí SLS 3D tiskárny [1]	15
Obr. 3 Tiskárna EOS P 770 [3]	16
Obr. 4 Schéma 3D tiskárny EOS P700 [1]	17
Obr. 5 Tiskárna 3D Systems sPro 230 [4]	17
Obr. 6 Schéma tiskárny 3D Systems Sinterstation [1]	18
Obr. 7 SLS 3D tiskárna Sharebot SnowWhite [5]	19
Obr. 8 SLS 3D tiskárna Sintratec [6]	19
Obr. 9 SLS 3D tiskárna ze serveru Instructables	20
Obr. 10 SLS 3D tiskárna You-SLS [8]	20
Obr. 11 Skenovací systém s F-Theta optikou [20]	23
Obr. 12 Srovnání optických členů pro zaostření laserového svazku [15]	23
Obr. 13 Mechanismus pro pohyb zrcadel [16]	24
Obr. 14 Schéma řídicího procesu	27
Obr. 15 Řídící elektronika Ramps 1.4 [21]	28
Obr. 16 Rozhraní softwaru Repetier-Host	29
Obr. 17 Schématický popis konceptu zařízení	31
Obr. 18 Schematické znázornění způsobu nanášení prášku mezi dvěma zásobníky	32
Obr. 19 Znázornění způsobu nanášení prášku se zásobníkem nad komorou.	32
Obr. 20 Schematické znázornění radiálního způsobu nanášení prášku	33
Obr. 21 Schematické zobrazení kartézského pohybového systému [22]	35
Obr. 22 Schematické zobrazení mechanismu Hbot [22]	35
Obr. 23 Schematické zobrazení mechanismu Core XY [22]	36
Obr. 24 Schematické zobrazení mechanismu v tiskárně Ultimaker [22]	36
Obr. 25 Schéma břitového recoateru	37
Obr. 26 Schéma válečkového recoateru	37
Obr. 27 Výsledek experimentu s CO ₂ laserem a práškem SS316L	38
Obr. 28 Varianta nanášecího zařízení s broušenými plochami	39
Obr. 29 Varianta nanášecího zařízení s broušenými elementy	40
Obr. 30 Výsledek experimentu s CO ₂ laserem a materiálem PA12	40
Obr. 31 Diodový laser o výkonu 6 W [23]	41
Obr. 32 Výsledek experimentu s diodovým laserem a Alumidem	42
Obr. 33 Vážení prášku pro směr hliníku a PA12	43
Obr. 34 Výsledek experimentu s diodovým laserem a směsí hliníku s PA12	43
Obr. 35 Model SLS 3D tiskárny	45
Obr. 36 SLS 3D tiskárna	46
Obr. 37 Odhalený model SLS 3D tiskárny	46
Obr. 38 Model stěn komory s rámem a tepelnou izolací	47
Obr. 39 Horní pohled na model komory	48
Obr. 40 Rozložená komora	48
Obr. 41 Nařezané silikonové pláty	49
Obr. 42 Utěsněná průchodka hřídele	49
Obr. 43 Přívod inertní atmosféry	50
Obr. 44 Model sestavy mechanismu pohybu v ose Z a vyhřívání platformy	51
Obr. 45 Kompletní osa Z	52
Obr. 46 Model sestavy nanášecího mechanismu	54

Obr. 47	Kompletní nanášecí mechanismus	55
Obr. 48	Rozložený koncový spínač nanášecího mechanismu	55
Obr. 49	Model dávkovacího zařízení	56
Obr. 50	Rozložený dávkovací mechanismus	57
Obr. 51	Vytisknuté plastové prototypy válce dávkovacího mechanismu	57
Obr. 52	Model mechanismu pro pohyb laseru	58
Obr. 53	Sestavený mechanismus pro pohyb laseru	59
Obr. 54	Model vyhřívacího zařízení	60
Obr. 55	Aktivní vyhřívací zařízení	61
Obr. 56	Zásobník prášku (vlevo) a odpadní nádoba (vpravo)	62
Obr. 57	Schéma zapojení elektroniky	64
Obr. 58	Elektronika	65
Obr. 59	Ověření funkce dávkovacího mechanismu	67
Obr. 60	Vrstva nanesená nanášecím zařízením	68
Obr. 61	Funkční vyhřívací zařízení	68
Obr. 62	Měření posuvu platformy úchylkoměrem	69
Obr. 63	Posuv platformy o vzdálenost 0,1 mm	69
Obr. 64	Ověření výhřevu platformy	70
Obr. 65	Sintrování materiálu laserem	70
Obr. 66	Sintrované vrstvy prášku při různých hustotách energie	71

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 1 Přehled 3D tiskáren výrobce EOS [3]	16
Tab. 2 Přehled 3D tiskáren výrobce 3D Systems [4]	18
Tab. 3 Procesní parametry ovlivňující výrobní proces [9, 10]	21
Tab. 4 Cenový rozpočet	66
Tab. 5 Parametry při výrobě vzorků	71

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Fotografická dokumentace
Příloha 2	Seznam nakoupených dílů
Příloha 3	Materiálový list Alumidu

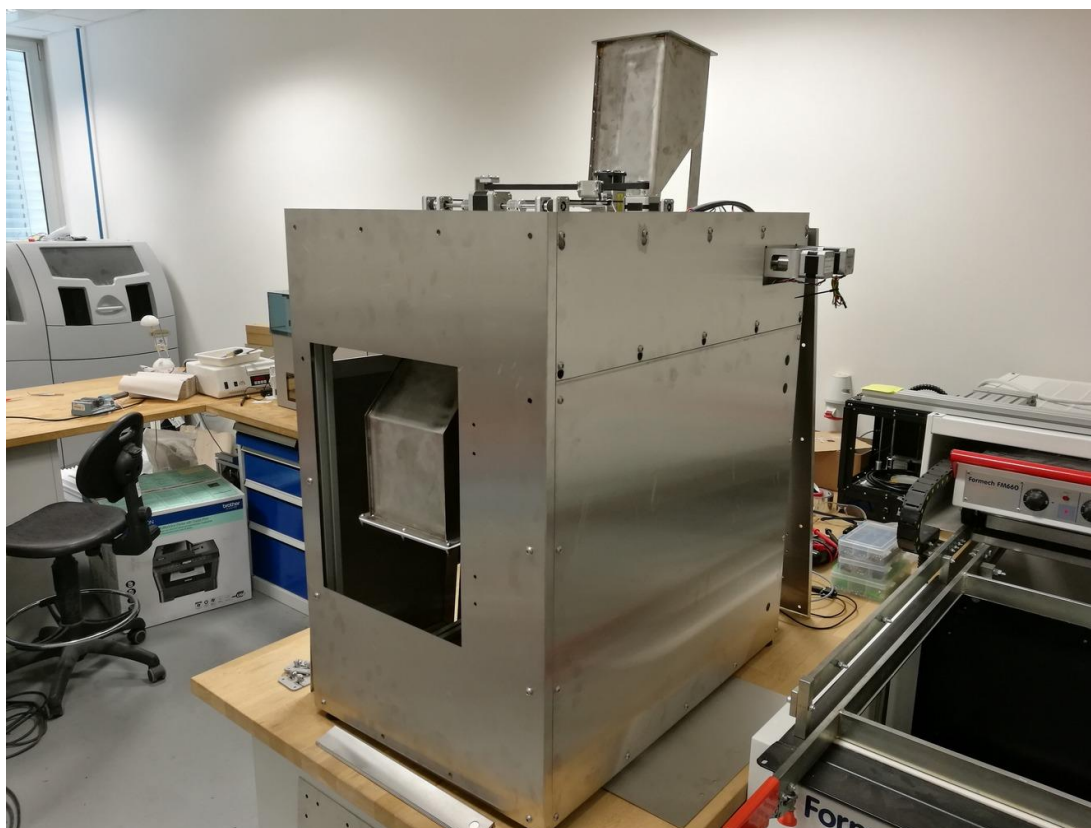
Externí přílohy:

Příloha 4	Výkres sestavení
Příloha 5	Úpravy firmwaru

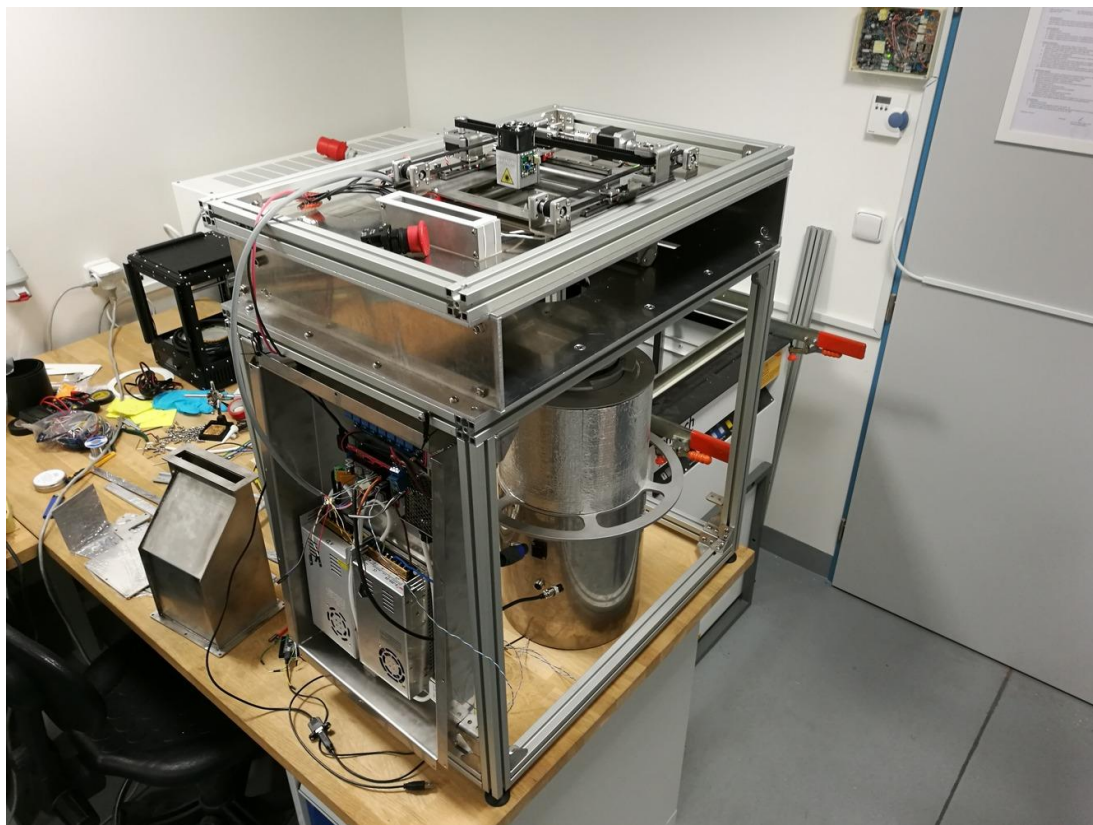
Příloha 1 Fotodokumentace



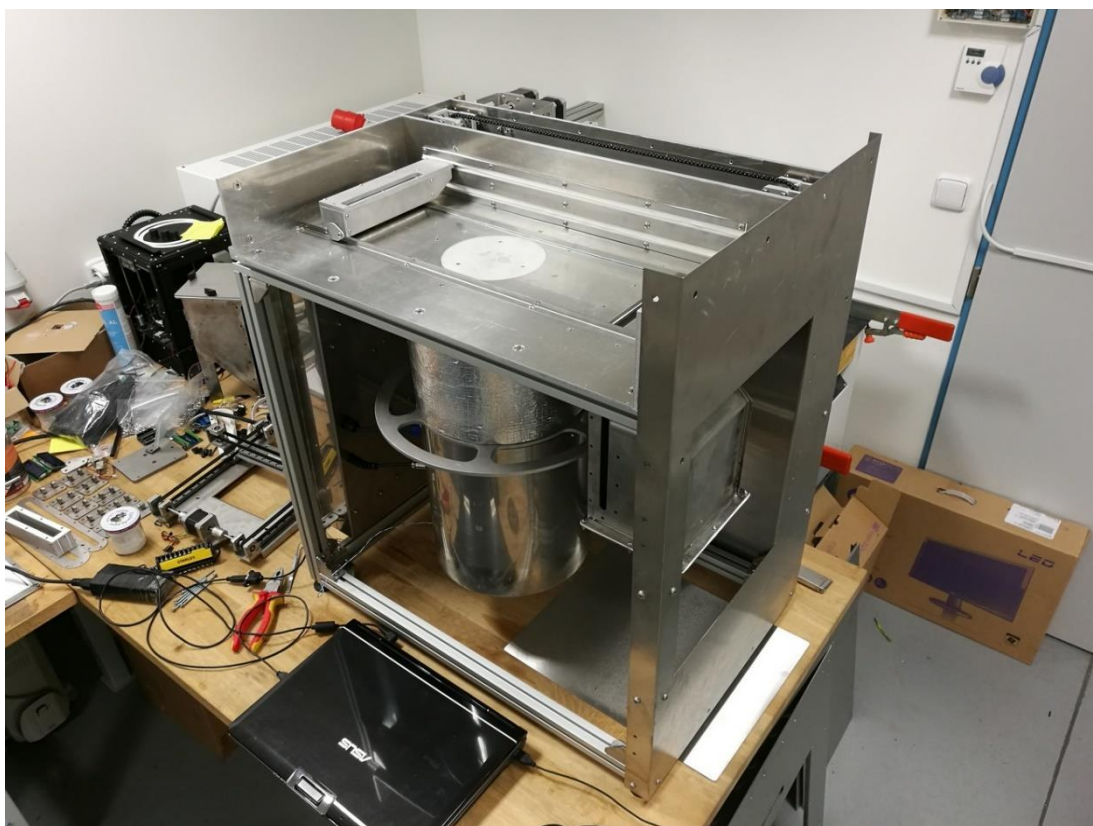
Přední pohled na tiskárnu



Zadní pohled na tiskárnu



Pohled shora na tiskárnu bez krytů



Pohled shora na komoru bez stropní části



Pohled do prostoru s mechanikou nanášecího mechanismu



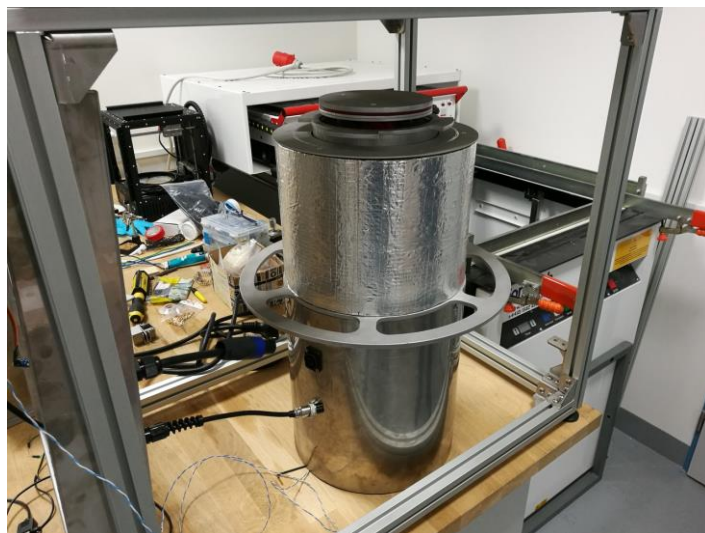
Dávkovací mechanismus a recoater



Detail řetězového mechanismu



Uchytení recoateru k rolničkovému vedení



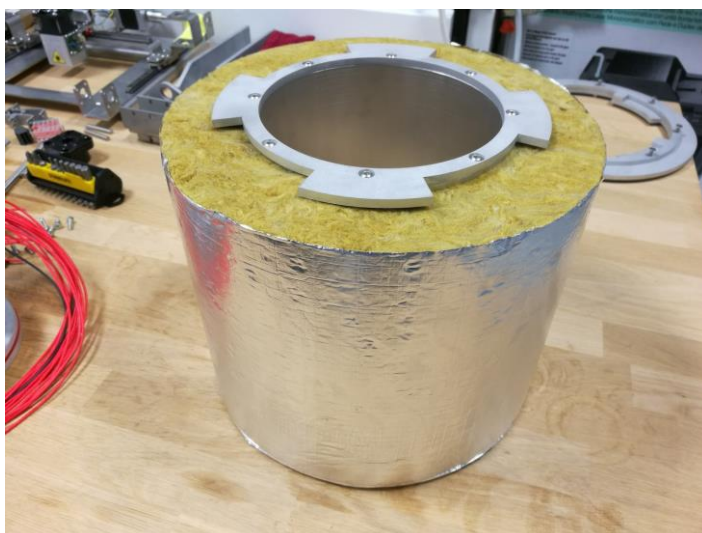
Osa Z



Pohled na platformu osy Z



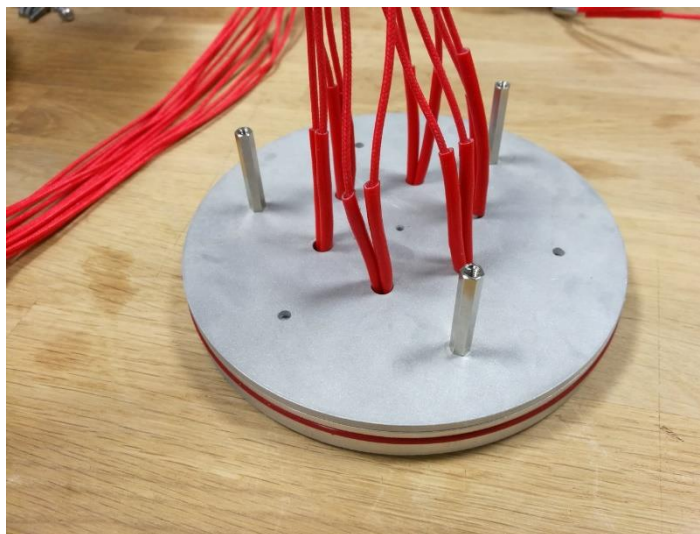
Mechanismus osy Z



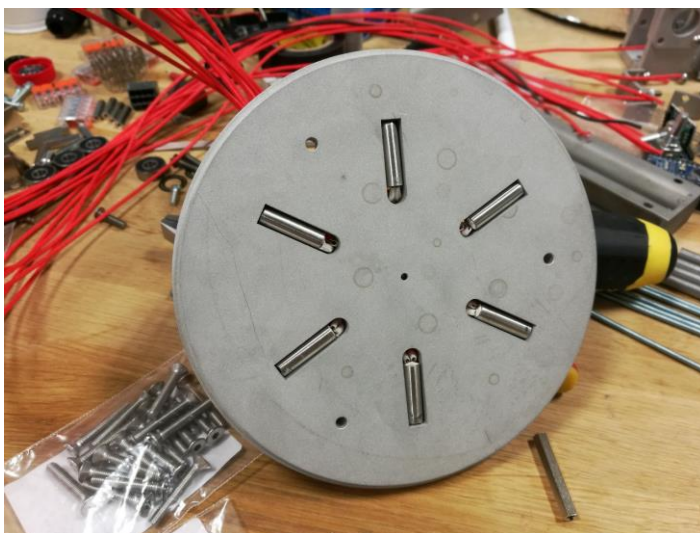
Tepelná izolace osy Z



Část mechanismu s vyhřívanou platformou



Vyhřívaná platforma



Vyhřívací patrony v platformě



Část bajonetového mechanismu



Recoater



Průchod mezi zásobníkem prášku a komorou



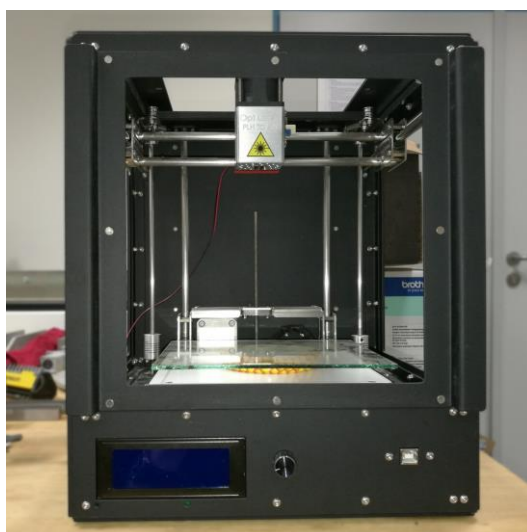
Sestavené mechanismy tiskárny



Ložiska s domky



Výroba nanášecího zařízení



Experiment s FDM 3D tiskárnou

Příloha 2 Seznam nakoupených dílů

Umístění	Komponenta	Typ	Mn.	Cena s DPH	Celkem	Prodejce (odkaz)
Společné	pružná spojka	5 mm/8mm	2	63 Kč	125 Kč	ebay
Společné	pružná spojka	5 mm/5mm	2	63 Kč	125 Kč	ebay
Společné	nerezová tyč	6 mm	1	28 Kč	28 Kč	Skořepka
Společné	nerezová tyč	8 mm	1	48 Kč	48 Kč	Skořepka
Společné	ložisko	22x8x7 (608)	6	15 Kč	90 Kč	Ložiska.net
Společné	ložisko	17x6x6 (606)	13	16 Kč	204 Kč	Adoz
Společné	mazací tuk	Molydal	1	332 Kč	332 Kč	HRK ložiska
Společné	prášek	Alumid 2 kg	2	1350	2 700 Kč	One3D
Společné	silikonové těsnění	1 mm, 1,5 mm	1	1 496 Kč	1 496 Kč	Gumex
Osa Z	hliníková trubka	160x10	0,225	2 468 Kč	526 Kč	ALMS
Osa Z	tepelná izolace stavěcího prostoru		1	229 Kč	229 Kč	Izomat
Osa Z	silikonový okroužek	134 x 3	1	110 Kč	110 Kč	ebay
Osa Z	distanční sloupky	M3 - 30	3	8 Kč	24 Kč	GME
Osa Z	uchycení vodících tyčí	SHF12	6	90 Kč	540 Kč	cncshop
Osa Z	přírubové dvojité kuličkové poudro	LMH12L	3	180 Kč	540 Kč	cncshop
Osa Z	vodící tyče	W12	0,786	330 Kč	259 Kč	cncshop
Osa Z	ozubená řemenice	HTD3 3M - 60 - 09	1	108 Kč	108 Kč	Řetězy olomouc
Osa Z	ozubená řemenice	HTD3 3M - 12 - 09	1	42 Kč	42 Kč	Řetězy olomouc
Osa Z	ozubený řemen	3M - 255 - 09	1	95 Kč	95 Kč	Alfaagro
Osa Z	kuličkový šroub		1	555 Kč	555 Kč	ebay
Osa Z	ložiskové jednotky	FF12/FK12	1	404 Kč	404 Kč	ebay
Osa Z	distanční sloupky	M3 - 20	12	6 Kč	76 Kč	GME
Osa Z	závitová tyč	M3	1,05	10 Kč	11 Kč	Fasteners
Osa XY	Diodový laser	PLH3D 6W (001277)	1	15 460 Kč	15 460 Kč	Optalasers
Osa XY	Ochranné brýle	CNC 445nm protection goggles (001138)	1	1 705 Kč	1 705 Kč	Optalasers
Osa XY	Lineární vedení - vozíky	MGN9H	3	177 Kč	532 Kč	ebay
Osa XY	Lineární vedení - kolejnice	MGN9 - 200 mm	3	183 Kč	549 Kč	ebay
Osa XY	ozubená řemenice	HTD 3M - 32	6	54 Kč	327 Kč	Řetězy olomouc

Osa XY	ozubený řemen	HTD 3M - 09	2,2	127 Kč	280 Kč	Alfaagro
Osa XY	distanční sloupky	M4 - 15	4	6 Kč	22 Kč	GME
Pohyb recoateru	Hliníková tyč	32 mm	0,160	46 Kč	47 Kč	ALMS
Pohyb recoateru	Tyč plochá	35x8	0,100	10 Kč	10 Kč	ALMS
Pohyb recoateru	Ozubený hřeben	M1 - 1000 mm	1	291,61	292 Kč	Řetězy olomouc
Pohyb recoateru	Ozubené kolo čelní s nábojem	M1 25 zubů	1	30,25	30 Kč	Řetězy olomouc
Pohyb recoateru	Řetězové kolo	04 B 21 zubů	2	76,23	152 Kč	Řetězy olomouc
Pohyb recoateru	Válečkový řetěz	04 B-1	1	250,47	250 Kč	Řetězy olomouc
Pohyb recoateru	Kolejnice	32 - 550 mm	1	972 Kč	972 Kč	Matis
Pohyb recoateru	Vozík	32	1	1 853 Kč	1 853 Kč	Matis
Nanášeč	Hliníková trubka	40x10	0,180	83 Kč	76 Kč	ALMS
Nanášeč	Hliníková tyč	20	0,165	21 Kč	21 Kč	ALMS
Nanášeč	O-kroužek - silikon	16 x 2	2	10 Kč	20 Kč	Alfaagro
Nanášeč	závitová tyč	M4	1	10 Kč	10 Kč	Fasteners
Infrazářič	halogenové zářiče	400 W	4	49 Kč	196 Kč	Bauhause
Infrazářič	halogenová objímka	-	8	15 Kč	120 Kč	Bauhause
Infrazářič	wago svorka	5 pinů	3	19 Kč	58 Kč	Bauhause
Infrazářič	magnet	10x3	18	4 Kč	77 Kč	ebay
Komora	hliníkové profily	30x30	12,00	263,78 Kč	3 165 Kč	Aluteckk
Komora	tepelná izolace	tl. 40 mm	1	412 Kč	412 Kč	Izomat
Komora	sklo	tl 2 mm	1	20 Kč	20 Kč	
Komora	O-kroužek - silikon	8 x 2	3	1,74	5 Kč	Alfaagro
Komora	nylonové sloupky	M6x11x8	100	0,8311	83 Kč	ebay
Komora	silikonové těsnění do dveří		1	100	100 Kč	Gumex
Komora	ochranné plexisklo	200x100x5	1	1484,91	1 485 Kč	Aliexpress
Komora	nožky		4	25	100 Kč	

Elektronika	Krokový motor	SX17-1005VLQCEF	4	301 Kč	1 205 Kč	Microcon
Elektronika	Krokový motor	SX17-0905D (hřídel na obě strany)	1	362 Kč	362 Kč	Microcon
Elektronika	Arduino	Mega R3 ATmega2560	1	529 Kč	529 Kč	Rebelove
Elektronika	Shield	Ramps 1.4	1	499 Kč	499 Kč	Rebelove
Elektronika	Drivery krokových motorů	DRV8825	5	94 Kč	470 Kč	Rebelove
Elektronika	Průmyslový zdroj	12V/350W	1	719 Kč	719 Kč	Rebelove
Elektronika	Průmyslový zdroj	24V/350W	1	1 050 Kč	1 050 Kč	cncshop
Elektronika	Infra bezkontaktní teploměr	MLX90614ESF-BAA	1	131 Kč	131 Kč	ebay
Elektronika	topné patrony	40 W 24 V	6	25 Kč	152 Kč	ebay
Elektronika	optický endstop	-	3	27 Kč	81 Kč	ebay
Elektronika	mechanický endstop	-	3	19 Kč	57 Kč	GME
Elektronika	Termistor	NTC 100 K	1	5 Kč	5 Kč	ebay
Elektronika	USB B panel	-	1	63 Kč	63 Kč	ebay
Elektronika	Síťový kabel	10 A 3x1,5	1	185 Kč	185 Kč	Bauhause
Elektronika	Emergency stop	-	1	110 Kč	110 Kč	cncshop
Elektronika	Bezpečnostní zámek	-	2	111 Kč	222 Kč	ebay
Elektronika	Odrušovací filtr	-	1	225 Kč	225 Kč	cncshop
Elektronika	Mikrofonní konektor do panelu	MIC338	1	36 Kč	36 Kč	GME
Elektronika	Mikrofonní konektor na kabel	MIC328	1	39 Kč	39 Kč	GME
Elektronika	Reproduktorový konektor do panelu	NEUTRIK NL4MP	1	55 Kč	55 Kč	GME
Elektronika	Reproduktorový konektor na kabel	NEUTRIK NL4FX	1	116 Kč	116 Kč	GME
Elektronika	Relé	-	1	87 Kč	87 Kč	ebay
Elektronika	Napěťový regulátor	-	1	132 Kč	132 Kč	ebay
Elektronika	Kabelová průchodka	KSS PG-16SR	1	29 Kč	29 Kč	GME
Elektronika	Kabelová průchodka	KSS PG-12SR	1	23 Kč	23 Kč	GME
Elektronika	Kabelová průchodka	KSS PG-16D	1	25 Kč	25 Kč	GME
Elektronika	Silový kabel pro pevné uložení	CYKY (J) 3Cx2,5	1	25 Kč	25 Kč	GME
Elektronika	Kabel DATACOM	FTP Cat.5e - OUTDOOR	1	19 Kč	19 Kč	GME
Elektronika	Silikonový vodič	HELUKABEL SiF 1X0,5mm2 černý	1	10 Kč	10 Kč	GME
Elektronika	Wago svorka	273-103	2	13 Kč	26 Kč	GME
Pneumatika	koleno		2	68 Kč	136 Kč	
Pneumatika	silencer		2	68 Kč	136 Kč	
Pneumatika	hadice		5	50 Kč	250 Kč	
Pneumatika	ventil		2	100 Kč	200 Kč	

Řez	hliníková trubka	160x10	1	42 Kč	42 Kč	ALMS
Řez	Hliníková tyč	32 mm	1	6 Kč	6 Kč	ALMS
Řez	Hliníková trubka	40x10	1	7 Kč	7 Kč	ALMS
Řez	Hliníková tyč	20	1	6 Kč	6 Kč	ALMS
Řez	Nerezové tyče		1	10 Kč	10 Kč	Skořepka

Spojovací materiál					1 000 Kč	Akros
Spojovací materiál					300 Kč	Fasteners

Doprava	Rebelove		1	95 Kč	95 Kč	Rebelove
---------	----------	--	---	-------	-------	--------------------------

Příloha 3 Materiálový list Alumidu

Alumide PA12-MD(Al)	EOS GmbH - Electro Optical Systems
-------------------------------	------------------------------------

Product Texts**Product Texts**

Alumide is a metallic grey, aluminium-filled polyamide 12 powder, which is characterised by its high stiffness, metallic appearance and good postprocessing possibilities.

Laser-sintered parts made from Alumide possess excellent material properties:

- excellent dimensional accuracy
- well-balanced ratio of density and stiffness
- increased thermal conductivity
- good machinability

The surfaces of Alumide parts can be refined very easily by grinding, polishing or coating. The machining of Alumide laser-sintered parts is simplified through the cut breaking effect of the aluminium filling.

A typical application for Alumide is the manufacture of stiff parts of metallic appearance for applications in automotive manufacture (e.g. wind tunnel tests or parts that are not safety-relevant), for tool inserts for injecting and moulding small production runs, for illustrative models (metallic appearance), for education and jig manufacture et al.

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Shore D hardness (15s)	76	-	ISO 868

3D Data	Value	Unit	Test Standard
The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.			
Tensile Modulus			ISO 527-1/-2
X Direction	3800	MPa	
Y Direction	3800	MPa	
Tensile Strength			ISO 527-1/-2
X Direction	48	MPa	
Y Direction	48	MPa	
Strain at break (X Direction)	4	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	29	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.6	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	3600	MPa	ISO 178
Flexural Strength (X Direction)	72	MPa	ISO 178
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.80 MPa, X Direction	144	°C	
0.45 MPa, X Direction	175	°C	
Volume resistivity (X Direction)	3E12	Ohm*m	IEC 60093

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.80 MPa	144	°C	
0.45 MPa	175	°C	
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	169	°C	ISO 306

Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity			IEC 60250
100Hz	13	-	
1MHz	10	-	
Dissipation factor (1MHz)	180	E-4	IEC 60250
Surface resistivity	5E14	Ohm	IEC 60093
Electric strength	0.1	kV/mm	IEC 60243-1

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (laser-sintered)	1360	kg/m ³	EOS Method

Characteristics**Processing**

Laser Sintering, Rapid Prototyping